



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DO FLUIDO DIELÉTRICO VEGETAL COM MINERAL SINTÉTICO E QUEROSENE NA ELETROEROSÃO DO AÇO AISI H13

Ernane Rodrigues da Silva

Belo Horizonte

2007

Ernane Rodrigues da Silva

**COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DO
FLUIDO DIELÉTRICO VEGETAL COM
MINERAL SINTÉTICO E QUEROSENE NA
ELETROEROSÃO DO AÇO AISI H13**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Wisley Falco Sales, Dr.

Co-Orientador: Prof. Ernani Sales Palma, Dr. – Ing.

Belo Horizonte
2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S586c

Silva, Ernane Rodrigues da

Comparação do desempenho do fluido dielétrico vegetal com mineral sintético e querosene na eletroerosão do aço AISI H13 / Ernane Rodrigues da Silva. Belo Horizonte, 2007.

110f. : il.

Orientador: Wisley Falco Sales

Co-Orientador: Ernani Sales Palma

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Usinagem por eletroerosão. 2. Diétricos. 3. Querosene. 4. Aspereza da superfície. I. Sales, Wisley Falco. II. Palma, Ernani Sales. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.7

Ernane Rodrigues da Silva

Comparação do desempenho do fluido dielétrico vegetal com mineral sintético e querosene na eletroerosão do aço AISI H13

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência em Engenharia Mecânica Belo Horizonte, 2007.

Wisley Falco Sales, Dr. (Orientador) – PUC Minas

Ernani Sales Palma, Dr. – Ing. (Co-Orientador) – PUC Minas

Marcelo Becker, Dr. (Membro interno) – PUC Minas

Sandro Cardoso Santos, Dr. (Membro externo) – CEFET-MG

Para minha esposa, Vânia A. Morais,
minha mãe, Nilza Rodrigues da Silva,
meus irmãos, Edson, Eliane, Geraldo, Luciano
e sobrinhos, João Pedro, Philippe, Francielle, Isabela, Bárbara e Juliana.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Wisley Falco Sales, meu orientador, pelo apoio integral e por acreditar no meu trabalho. Um grande amigo que sempre será referenciado com apreço.

Ao professor Ernani Sales Palma, meu co-orientador, pela presteza e ajuda na realização deste trabalho.

Aos professores Marcelo Becker e José Rubens Gonçalves Carneiro, pelas informações relevantes.

Ao meu amigo, Rogério Felício dos Santos, pela ajuda nos trabalhos desenvolvidos antes e durante os experimentos.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Mecânica e Mecatrônica da PUC Minas, Carlos Eduardo do Santos, Vinícius Maia de Sá, Pedro Kapler, Leandro César da Silva e Marceliny Nardi Torrecília pela ajuda incondicional. Aos técnicos do laboratório de construção civil, Misael Fernandes Barbosa e Roberto Moura Lara.

Ao meu amigo, José Eustáquio Moura de Oliveira, pelos trabalhos de soldagem.

Ao Marcelo Neves Martins, da Cooper Power Systems, por doar o fluido vegetal sintético usado nos experimentos.

Ao meu amigo Joel Lima, pela valiosa colaboração e disposição durante a obtenção dos créditos.

A Valéria Aparecida Gomes, secretária da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela atenção nos esclarecimentos de dúvidas sobre o curso. À estagiária da secretária Letícia da Anunciação Silva.

À Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e ao Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realizar este trabalho.

À FAPEMIG, pela liberação de recursos para aquisição da máquina de eletroerosão e de material de consumo, por meio do projeto TEC 798/2005.

Ao Cefet-MG, pela redução parcial da carga horária de trabalho e concessão de bolsa parcial.

Aos coordenadores, professores e funcionários do curso técnico de mecânica do Cefet-MG, que me ajudaram de forma direta ou indireta.

Ao professor Ivan José Santana, pela confiança em mim depositada.

Ao Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), pelo trabalho de Microscopia Eletrônica de Varredura e ao operador do aparelho, Eduardo Antônio de Carvalho.

À professora Helena de Pinho, pela paciência e incentivo.

À professora Alcione Gonçalves, pela atenção e colaboração.

Ao professor Claudinei José de Oliveira, pela valorosa colaboração durante a obtenção dos créditos.

RESUMO

Estudar o comportamento do fluido dielétrico, usado no processo de usinagem, não convencional de eletroerosão (EDM), especificamente um de origem vegetal para transformadores, foi o alvo deste trabalho de pesquisa. O mesmo foi comparado ao querosene e a um fluido mineral sintético, próprio para eletroerosão. Os três fluidos trabalharam nos regimes de acabamento, menos severo para superfície da peça usinada, que retira uma quantidade menor de material e, conseqüentemente, danifica menos sua superfície, ao contrário do regime de desbaste, que promove maiores danos com a maior retirada de material. Para atingir os regimes, os parâmetros da máquina foram ajustados de acordo com as especificações do manual do fabricante. Foram avaliados os aspectos que levam em conta a retirada de material dos eletrodos peça e ferramenta, como taxas de remoção de material da peça e desgaste da ferramenta. Por meio de medições de rugosidade, microdureza, micrografias e microscopias ótica e eletrônica de varredura, foi avaliada a integridade da superfície. Os resultados foram expressos em tabelas e gráficos, permitindo uma comparação visual do comportamento dos três fluidos dielétricos. No regime de desbaste, o fluido vegetal sintético promoveu uma maior retirada de material da peça, em comparação aos outros. No regime de acabamento, a quantidade de material retirada pelo fluido vegetal foi menor do que a do mineral sintético e maior do que a do querosene. O desgaste da ferramenta ocorreu de forma acentuada com o fluido vegetal, em relação aos outros, nos dois regimes de trabalho. Os três fluidos produziram superfícies semelhantes, formação da zona branca fina no regime de acabamento e espessa no regime de desbaste. Microtrincas e poros surgiram sobre as superfícies usinadas pelos três fluidos, bem como partículas erodidas aderiram sobre as mesmas.

Palavras-chave: Eletroerosão; fluidos dielétricos; fluido vegetal; fluido sintético; querosene; integridade superficial.

ABSTRACT

Studying the behavior of the dielectric fluid used in the process of non-conventional machining of electrical discharge machining (EDM) was the objective of this study, specifically one plant origin for transformer. The same was compared to a kerosene and synthetic mineral fluid, fit for electron erosion. The three worked in systems of finish, less severe for surface of the machining piece since, withdrawing a quantity of material and consequently less damage least its surface, unlike the regime of thinning, which promotes greater damage, with the largest withdrawal of material. To achieve the scheme, the parameters of the machine were adjusted in accordance with the specifications of the manufacturer's manual. They were evaluated aspects that take into account the removal of material of electrodes piece and tool, as removal rates of material and wear. Through microscopy optical and electron-scan, was assessed the integrity of the area. The results were expressed in tables and charts, allowing for visual comparison of the behavior of the three dielectric fluids. In the regime of thinning, the fluid plant synthetic promoted greater withdrawal of the piece of material, compared to others. In the scheme of finishing the amount was between the other, less than the synthetic mineral, but higher than the kerosene. The wear of the tool was so marked with the plant fluid, compared with other, the two scheme word. The three fluids produced similar areas, the training area in the scheme of thin white finish and very thick in thinning. There were micro-cracks, pore and particle uprooted joined on all surface machining.

Key-words: EDM; dielectric fluids; vegetal fluid; synthetic fluid; kerosene; superficial integrity.

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino:

V_w	taxa de remoção de material	[mm ³ /min]
V_e	taxa de desgaste	[mm ³ /min]
u	tensão média de trabalho	[V]
\hat{U}_i	tensão em aberto	[V]
u_e	tensão média da descarga	[V]
t_d	tempo de retardo de ignição	[μs]
t_e	duração da descarga	[μs]
t_i	duração do pulso de tensão	[μs]
t_o	tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_i	[μs]
t_p	tempo de período do ciclo de uma descarga	[μs]
\hat{i}_e	corrente máxima durante a descarga	[A]
i_e	corrente média durante a descarga	[A]
R_a	média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição	[μm]
R_z	média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial Z_i	[μm]
TS	<i>Transistor standard</i> – define a quantidade de corrente	
DT	relaciona o tempo de pausa entre duas descargas consecutivas	%
T_{on}	igual ao tempo t_i	[μs]
T_{off}	Igual ao tempo t_o	[μs]

Alfabeto grego:

ϑ	desgaste relativo	%
τ	relação de contato	

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	11
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Justificativa.....	12
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	13
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	13
1.3 Organização do trabalho.....	14
CAPÍTULO 2	15
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Estado da arte – Histórico do processo de eletroerosão.....	15
2.2 A máquina de eletroerosão e equipamentos.....	21
2.3 Mecanismo de remoção do material.....	23
2.4 Parâmetros do processo.....	27
2.5 Principais aspectos avaliados após o processo.....	28
2.6 A influência dos parâmetros do processo.....	30
2.7 Fluido dielétrico.....	35
2.8 Limpeza da fenda de trabalho.....	37
2.9 Material do eletrodo ferramenta.....	43
2.10 Integridade da superfície.....	44
2.11 Óleo vegetal como fluido dielétrico.....	48
CAPÍTULO 3	49
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	49
3.1 Ajuste dos parâmetros da máquina.....	49
3.2 Modificação no sistema de alimentação do fluido dielétrico.....	55
3.3 Material e formato das amostras.....	61
3.4 Material e formato do eletrodo ferramenta.....	65
3.5 Determinação da variação de massa de peça (amostra) e ferramenta.....	66
3.6 Análise da taxa de remoção de material da peça (amostra).....	67
3.7 Determinação da taxa de desgaste do eletrodo ferramenta.....	68
3.8 Rugosidade.....	68
3.9 Preparação das amostras e análise de microscopia ótica.....	69
3.10 Análise via microscópio eletrônico de varredura.....	71
3.11 Análise de micro-dureza.....	72
CAPÍTULO 4	73
RESULTADOS E ANÁLISES	73
4.1 Variação de massa dos eletrodos peça e ferramenta.....	73
4.2 Taxa de variação volumétrica das peças (amostras).....	78
4.3 Variação volumétrica dos eletrodos ferramentas.....	80
4.4 Desgaste volumétrico relativo.....	82
4.5 Arredondamento de cantos e <i>over-cut</i>	84
4.6 Rugosidade.....	85
4.7 Morfologia da superfície da cavidade.....	90
4.8 Micro-dureza na região termicamente afetada pelo calor.....	97

CAPÍTULO 5	100
CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS GERAIS	100
5.1 Conclusões.....	100
5.2 Comentários gerais.....	102
5.3 Sugestões para futuros trabalhos.....	102
REFERÊNCIAS	104
ANEXOS	
Anexo A – Propriedades químicas e físicas do querosene.....	108
Anexo B – Boletim técnico do fluido mineral sintético.....	109
Anexo C – Manual de informações do produto Envirotemp FR3.....	110

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

O que caracteriza o processo de usinagem é a transformação da matéria prima em produto por meio de remoção de material em forma de cavacos. Na usinagem convencional, o material é retirado por cisalhamento devido à ação de uma ferramenta de corte, como no torneamento, fresamento, furação, etc. Na usinagem não-convencional, são empregadas outras modalidades de energia para remover o material, como ultra-som, *laser*, plasma, fluxo abrasivo, reações químicas e eletroquímicas, feixes de elétrons, entre outras.

O processo de fabricação por descargas elétricas (*Electrical Discharge Machining* – EDM), popularmente conhecido como eletroerosão, destaca-se entre os processos não-convencionais, devido à sua aplicação na confecção de peças em material com elevada dureza sem contato direto entre ferramenta e peça, que ficam submersas em um fluido dielétrico, durante a execução do corte, bem como a confecção de peças de formas complexas e dimensões reduzidas.

Muitos aspectos foram avaliados e discutidos ao longo dos anos, desde que o processo foi desenvolvido pelo casal russo, os Lazarenko, porém, muitas informações sobre o processo ainda não são bem compreendidas.

Por muito tempo, o principal fluido dielétrico, utilizado no processo de eletroerosão, foi o querosene, graças ao seu baixo preço, sendo esta sua principal vantagem. Porém, o mesmo é extremamente nocivo e prejudicial à saúde do operador, além de agredir e contaminar o meio ambiente. Devido a esses inconvenientes, o mesmo foi substituído por óleos de origem mineral sintéticos nos países do primeiro mundo. No Brasil, o querosene ainda é um fluido dielétrico, utilizado no processo.

É provável que nas próximas décadas o fluido mineral sintético também tenha que ser substituído por um produto 100% biodegradável, não tóxico, com menor risco de acidentes no manuseio e no armazenamento, protegendo, assim, a saúde do operador da máquina, bem como o meio ambiente. Uma solução possível

seria o uso de óleo vegetal. Sua fonte renovável caracteriza-se como outra vantagem desse óleo em comparação ao mineral sintético e à querosene.

Existem poucas informações sobre a verdadeira eficiência de diferentes fluidos dielétricos no processo de Eletroerosão. O que conduz o pensamento humano a buscar informações mais coerentes com a nossa realidade.

1.1 Justificativa

A busca por produtos alternativos para suprir os de origem petrolífera é uma necessidade iminente. Além do que, exigências legais, com relação à preservação do meio ambiente e à saúde pública, tornaram-se fatores preponderantes, logo, produtos não tóxicos, biodegradáveis, recicláveis destacam-se em todas as áreas. A utilização do querosene como fluido dielétrico contrapõe-se a essas características por se tratar de um produto nocivo à saúde do operador e agredir o meio ambiente. O ideal talvez fosse substituí-lo por produtos menos agressivos.

Os fluidos dielétricos de origem mineral sintéticos vêm aos poucos sendo utilizados nesse processo de mudança, porém ainda não são biodegradáveis. Outros fluidos podem, talvez, desempenhar este papel, por exemplo, os óleos de origem vegetal, que certamente seriam uma das prováveis soluções para quase todos os inconvenientes citados. Porém, os mesmos ainda não foram devidamente desenvolvidos e investigados com relação aos quesitos: desempenho e eficiência quando utilizados como fluido dielétrico no processo de fabricação por eletroerosão por penetração. Portanto, a necessidade de pesquisas desse fluido dielétrico neste campo de aplicação é de suma importância. Bem como compará-lo com os fluidos usados atualmente.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo geral*

Avaliar o desempenho do fluido dielétrico vegetal sintético para transformadores na usinagem de eletroerosão por penetração nos regimes de trabalho, acabamento e desbaste, do aço AISI H13, comparando-o ao comportamento de um fluido mineral sintético próprio para eletroerosão e do querosene.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- ▶ Quantificar a taxa de remoção do material, promovida pela usinagem por eletroerosão, utilizando eletrodo ferramenta de cobre em amostras de aço AISI H13, submersas em fluido dielétrico vegetal sintético, mineral sintético e querosene;
- ▶ Quantificar o desgaste do eletrodo ferramenta de cobre no processo de eletroerosão com fluidos dielétricos diferentes;
- ▶ Avaliar o desgaste relativo entre eletrodo ferramenta de cobre e amostra de aço após a eletroerosão com fluidos dielétricos diferentes;
- ▶ Medir a rugosidade das amostras de aço AISI H13 usinadas pelo processo de eletroerosão com fluidos dielétricos diferentes nos regimes de acabamento e desbaste;

- ▶ Analisar a integridade da superfície (alterações superficiais e sub-superficiais) de amostras de aço AISI H13 usinadas pelo processo de eletroerosão com fluidos dielétricos diferentes.

1.3 Organização do trabalho

O texto deste trabalho foi estruturado em capítulos. Neste primeiro, faz-se uma “Introdução” ao trabalho, enfocando o estudo e os objetivos.

O Capítulo 2 tem como finalidade proporcionar uma compreensão básica do processo de eletroerosão por penetração por meio da “Revisão Bibliográfica”, na qual foram abordados os temas relevantes ao trabalho. Essa compreensão deverá promover um entendimento do comportamento dos fluidos dielétricos, observado nos ensaios experimentais.

O Capítulo 3 reporta aos “Procedimentos Experimentais”, onde são apresentados metodologias, materiais, equipamentos e parâmetros para a realização dos experimentos.

No Capítulo 4, “Discussões dos Resultados”, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais realizados, confrontando as possíveis diferenças encontradas no processo de eletroerosão, utilizando os três fluidos diferentes.

No Capítulo 5, são apresentados “Conclusões e comentários gerais” que têm o intuito de complementar o presente trabalho, bem como, propiciar informações relevantes que possam ajudar na realização de trabalhos futuros.

As “Referências Bibliográficas” são apresentadas após o Capítulo 5.

As páginas finais deste trabalho são reservadas para os anexos que o compõem, como as especificações técnicas referentes aos três fluidos dielétricos, usados nos experimentos (querosene, mineral sintético e vegetal sintético, nesta ordem).

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os temas referentes à eletroerosão por penetração que expõem a invenção do processo, a máquina e os equipamentos, o fenômeno de erosão por descargas elétricas, os parâmetros ajustados na máquina, bem como a influência dos mesmos, principais aspectos a serem avaliados após o processo, funções do fluido dielétrico, material da ferramenta e a integridade da superfície usinada por eletroerosão.

2.1 Estado da arte – Histórico do processo de eletroerosão

Segundo Descoeudres (2006), as raízes históricas do processo datam da descoberta de descargas produzidas por fenômenos naturais, como relâmpago, e da produção de descargas artificiais, relacionadas próximo ao desenvolvimento de fontes de energia elétricas. As primeiras investigações de fenômenos eletrostáticos foram executadas por meio de máquinas de fricção durante a primeira metade do século XVIII.

Joseph Priestley, químico inglês, foi o primeiro a descobrir, em 1766, o efeito erosivo das descargas elétricas. Após ter descarregado uma bateria, observou uma cratera formada pelo derretimento do material na superfície do cátodo (Descoeudres, 2006). Porém, somente cem anos depois, este fenômeno teve uso prático, de acordo com McGeough (1988). No início, o efeito das descargas elétricas era aplicado na remoção de machos, brocas ou punções quebrados no interior de peças.

Em 1943, durante a segunda guerra mundial, quando o casal de cientistas russos, Boris R. Lazarenko e Natalya I. Lazarenko, incumbido de investigar o

desgaste provocado por faíscas entre contatos de interruptores, deduziu a possibilidade de usar o fenômeno das descargas elétricas na usinagem de novos metais como carboneto de tungstênio, que eram difíceis de serem usinados pelos processos tradicionais (McGeough, 1988). Os Lazarenko perceberam que a energia da centelha deveria ser baixa e controlada para promover uma aplicação eficaz na usinagem.

Até aquele momento, as técnicas usadas para desintegrar metais eram desajeitadas, com acabamento superficial ruim, sem nenhuma reprodução de detalhes e muita energia da descarga era perdida. Eles desenvolveram um sistema de resistor-capacitor (RC), que ficou conhecido como circuito de Lazarenko, mostrado na figura 1, em que a ferramenta e a peça ficam submersas em um fluido dielétrico, dentro de um tanque de trabalho, conectadas a resistores e a capacitores carregados por uma fonte de corrente contínua (Jameson, 2001). Quando ocorre o aumento da voltagem do capacitor, uma centelha é criada na região de menor resistência elétrica, localizada, normalmente, entre a ferramenta e a peça. Após cada descarga, o capacitor é recarregado pela fonte de corrente contínua, por meio do resistor e uma nova centelha é produzida. O dielétrico serve para concentrar a energia de descarga em uma pequena fenda entre a peça e a ferramenta.

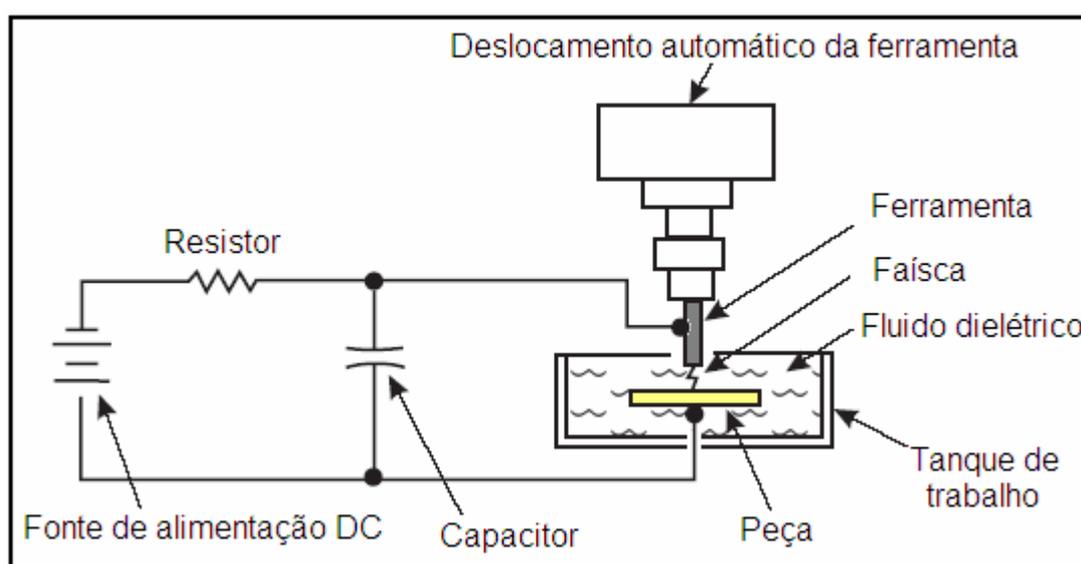


Figura 1: Circuito Resistor-Capacitor (RC) de Lazarenko para eletroerosão (JAMESON, 2001).

De acordo com Silva (2006), o circuito de Lazarenko apresentava como vantagens: simplicidade construtiva, confiabilidade, baixo custo e facilidade de usinagem de superfícies com alto grau de acabamento. Pela primeira vez, foi possível um controle do tempo dos pulsos de tensão, fato que propiciou a constatação de que determinadas distâncias entre os eletrodos resultavam em melhores taxas de remoção de material.

Pode-se introduzir um circuito simples de controle no servo mecanismo de avanço do eletrodo ferramenta, proporcionando o ajuste automático da distância entre os eletrodos conforme a situação da fenda de trabalho, diminuindo ou eliminando a formação de arcos elétricos e curtos circuitos durante a usinagem.

A figura 2 ilustra os componentes básicos do processo de eletroerosão. O processo ocorre entre dois materiais condutores eletricamente, um eletrodo-ferramenta e o outro eletrodo-peça, por meio das faíscas produzidas por descargas elétricas na presença de um líquido dielétrico. Durante o processo, a ferramenta não entra em contato com a peça, logo nenhuma força de corte atua contra a mesma. A ferramenta trabalha sempre afastada da peça, mantendo uma fenda de trabalho denominada *gap*. As primeiras descargas elétricas ocorrem nos pontos mais próximos das superfícies dos eletrodos ferramenta e peça provocando um aumento na distância entre ambas, a fenda de trabalho, então, é compensada pelo deslocamento de aproximação do eletrodo ferramenta.

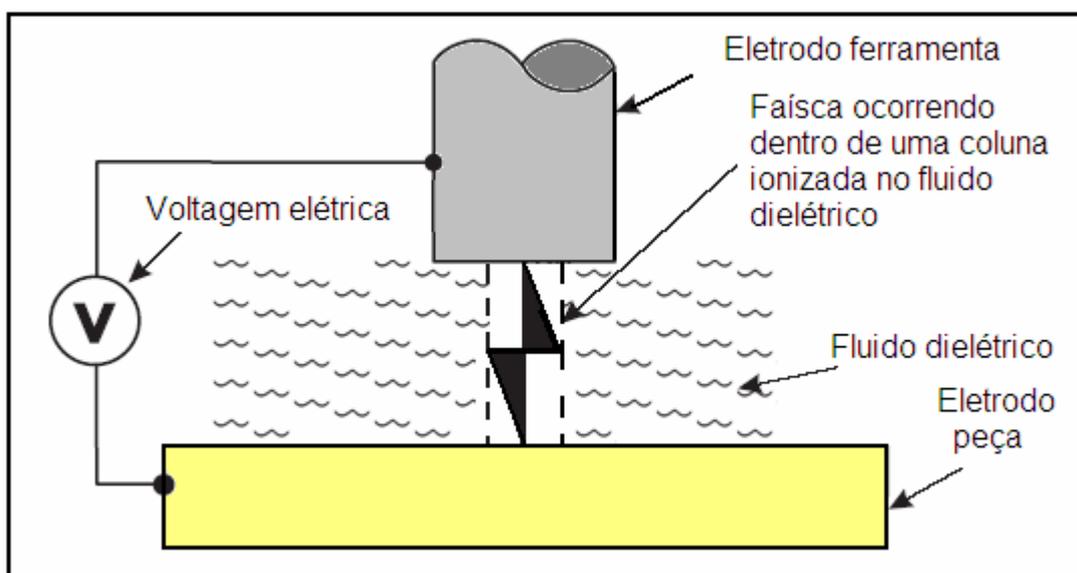


Figura 2: Componentes básicos do processo de eletroerosão (JAMESON, 2001).

A eletroerosão é um processo térmico, o material é removido pelo calor promovido pelo fluxo de eletricidade entre eletrodos ferramenta e peça. O material, nos pontos mais próximos dos eletrodos ferramenta e peça, onde a faísca inicia e termina, aquece a ponto de vaporizar-se, com isso uma quantidade de material é arrancada das superfícies e arrastada para fora da fenda de trabalho pelo líquido dielétrico. A área aquecida por cada faísca é rapidamente refrigerada pelo fluido dielétrico, bem como pequena quantidade de material arrancada. Algumas mudanças metalúrgicas ocorrem na superfície do eletrodo peça, devido ao resfriamento brusco. Outra função do fluido dielétrico no processo é se manter isolante elétrico por um tempo, conhecido como tempo de ionização, até atingir uma tensão elétrica, tornando-se condutor. Quando a faísca termina, o fluido torna-se isolante elétrico novamente.

Eletrodos ferramenta e peça não podem entrar em contato, o que provocaria curto circuito, não permitindo o funcionamento do sistema, eles ficam afastados mantendo a fenda de trabalho durante o processo. Essa fenda é a região de menor resistência elétrica, onde ocorrem as descargas elétricas, formando as centelhas que promovem a remoção de material através da erosão, produzida pelo choque de íons e de elétrons que circulam no fluido dielétrico.

Os eletrodos peça e ferramenta sofrem o efeito da erosão, porém menos metal é retirado do eletrodo positivo, o anodo, que geralmente é a ferramenta. A figura 3 ilustra esse efeito.

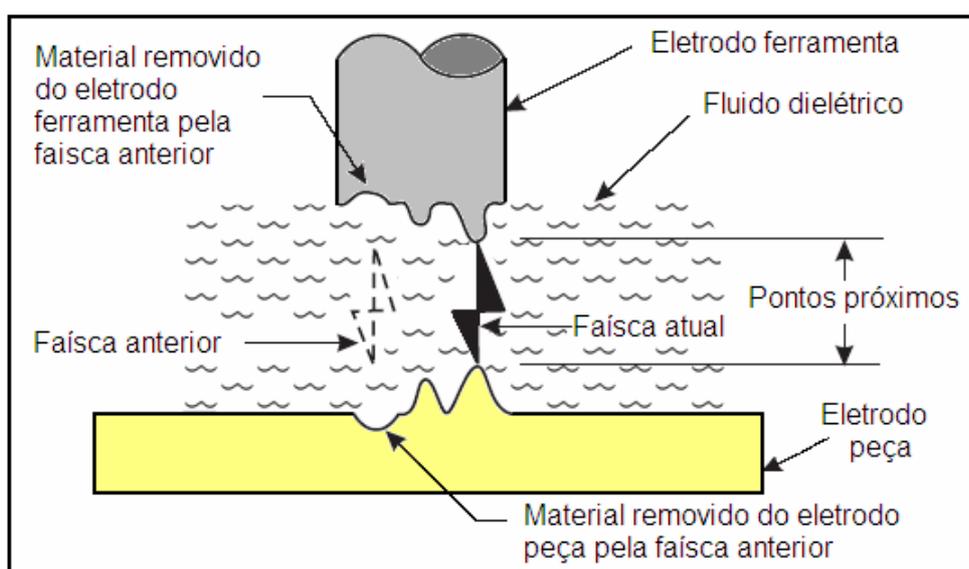


Figura 3: As faíscas ocorrem nos pontos mais próximos das superfícies entre os eletrodos ferramenta e peça (JAMESON, 2001).

Um canal de plasma forma-se entre eletrodos ferramenta e peça, localizado na região da fenda de trabalho. O canal mantém, no seu interior, uma pressão muito alta e um fluxo de elétrons e íons que circulam livremente enquanto a corrente é ativada. No momento em que a corrente é desligada, a pressão cai bruscamente, promovendo o choque dos elétrons e dos íons contra as superfícies dos eletrodos (McGeough, 1988).

O dielétrico concentra a energia de descarga em um canal muito pequeno na área da seção transversal do eletrodo ferramenta. Ele também tem a função de limpar os produtos de usinagem para fora da região da fenda de trabalho. A resistência elétrica do dielétrico influencia a energia de descarga e o tempo de iniciação da centelha. Se a resistência é baixa, uma descarga acontecerá rapidamente, se alta, o capacitor atingirá um valor mais alto de carga antes da centelha da descarga acontecer. Isso significa que a energia e a taxa de repetição das centelhas dependem das condições da fenda de trabalho entre os eletrodos. Como sua duração e área na qual é aplicada são pequenas, a centelha funde e vaporiza uma porção minúscula do material da peça nas regiões próximas à mesma. O efeito de sucessivas centelhas (faíscas) sobre a superfície do eletrodo peça promove a sua erosão, ou usinagem, dando forma a uma cavidade que tem as características dimensionais do eletrodo ferramenta.

Para que o circuito de tensão seja aberto e o de corrente fechado, possibilitando, dessa forma, o controle da fonte trabalhar com corrente e tempo de descarga, indicados pelo operador da máquina, é necessário um sistema gerador. Uma fonte de corrente contínua carrega o capacitor, gerando um gradiente de campo elétrico entre os eletrodos até o nível de rompimento da tensão do dielétrico (Silva, 2006).

Para um perfeito funcionamento do sistema, o eletrodo ferramenta deve aproximar-se do eletrodo peça, para isso, um servo sistema é necessário para assegurar que o eletrodo ferramenta se mova com taxa própria, mantendo a fenda de trabalho apropriada para a centelha, bem como, afastando-se para retirada por meio do fluido dielétrico das partículas erodidas. Geralmente, o servo sistema compara a voltagem da fenda de trabalho com um valor de referência, assegurando-se ao mesmo a capacidade de avançar ou de afastar o eletrodo ferramenta, conforme a necessidade.

O processo de usinagem por eletroerosão, não sofre influência da dureza do material da peça, que precisa ser apenas condutor de eletricidade. Para usinar peças de forma variadas, a ferramenta tem o formato do negativo da cavidade que desejasse obter na peça (figura 4). O processo é extensamente utilizado na fabricação de matrizes para estampagem e moldes para injeção, conjuntos que têm como característica imprescindível, para seu funcionamento, a dureza, em geral, extremamente alta. O processo de eletroerosão usina todo tipo de material que possua condutividade elétrica, no mínimo 10^{-2} S/cm, por mais duro que seja.

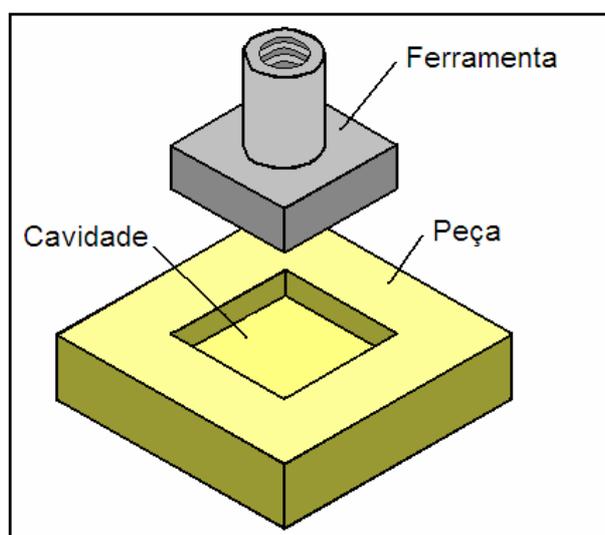


Figura 4: O formato da ferramenta produz a forma da cavidade na peça (ENGEMAQ, 2002).

Além de usinar materiais extremamente duros, outras vantagens do processo, segundo Fuller (1989), são: peças com cavidades de paredes finas, de geometrias complexas e livres de rebarbas.

A temperatura na região da centelha pode atingir a ordem de 12.000°C . O tamanho da fenda de trabalho tem influência direta na realização do processo de erosão. Folgas maiores aumentam o poder de destruição da centelha na superfície dos eletrodos peça e ferramenta. O fluido dielétrico reduz a distância entre eletrodos, o que promove um controle na remoção de material. Para dar forma à peça, o efeito das faíscas deve ocorrer por várias vezes consecutivas, com isto, o eletrodo ferramenta deve se aproximar cada vez mais do eletrodo peça, o servo sistema mantém este funcionamento. Um sistema de filtragem é importante, pois

as partículas erodidas arrancadas do material se misturam ao fluido dielétrico e, quando não retidas, elas circulam livremente no interior do fluido, podendo provocar curto circuito na região entre eletrodos peça e ferramenta, não deixando com que o processo funcione adequadamente.

2.2 A máquina de eletroerosão e equipamentos

A figura 5 ilustra o esquema de uma máquina de eletroerosão por penetração que, segundo Benedict (1987), possui quatro subconjuntos principais, fonte de alimentação (constituída pela fonte de corrente contínua, controle de frequência, voltímetro e amperímetro), sistema dielétrico (fluido dielétrico, cuba de trabalho, reservatórios, bombas, filtro, rotâmetro e manômetro) e eletrodos (ferramenta e peça) e servo sistema de avanço da ferramenta.

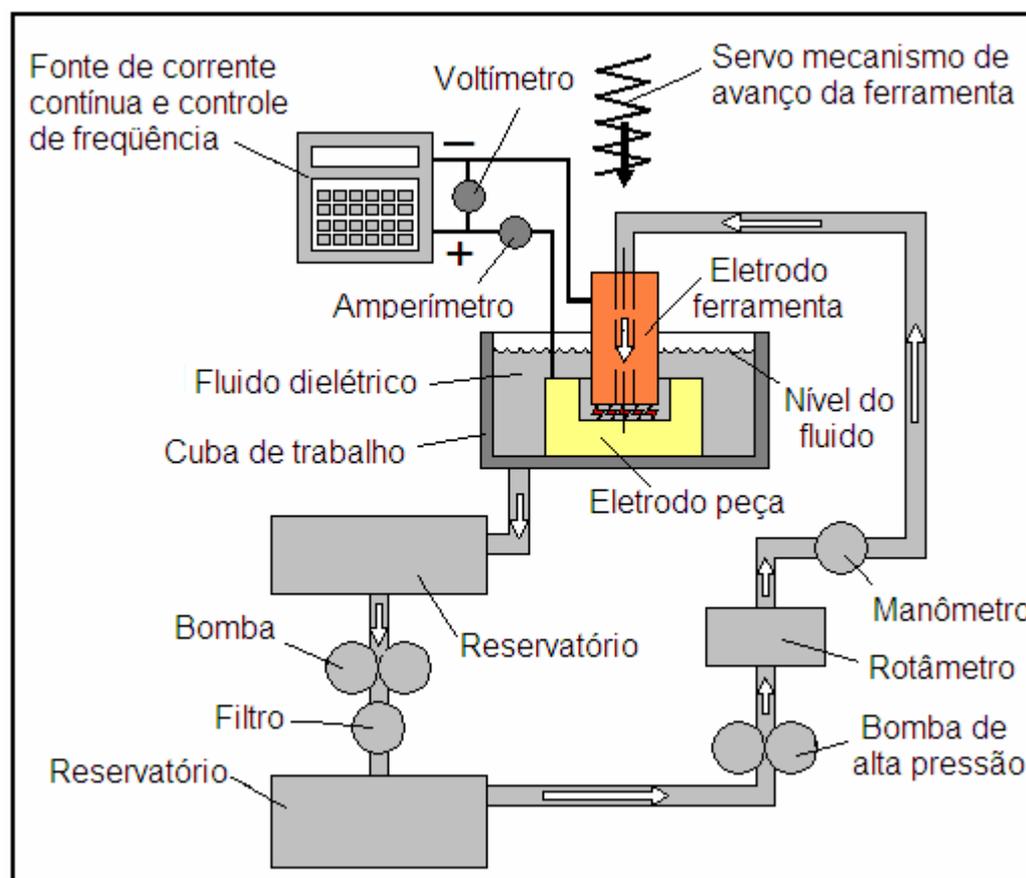


Figura 5: Esquema dos elementos constitutivos de um equipamento EDM (BENEDICT, 1987).

De acordo com Silva (2006), a máquina de eletroerosão por penetração possui três sistemas: mecânico, elétrico e dielétrico (figura 6).

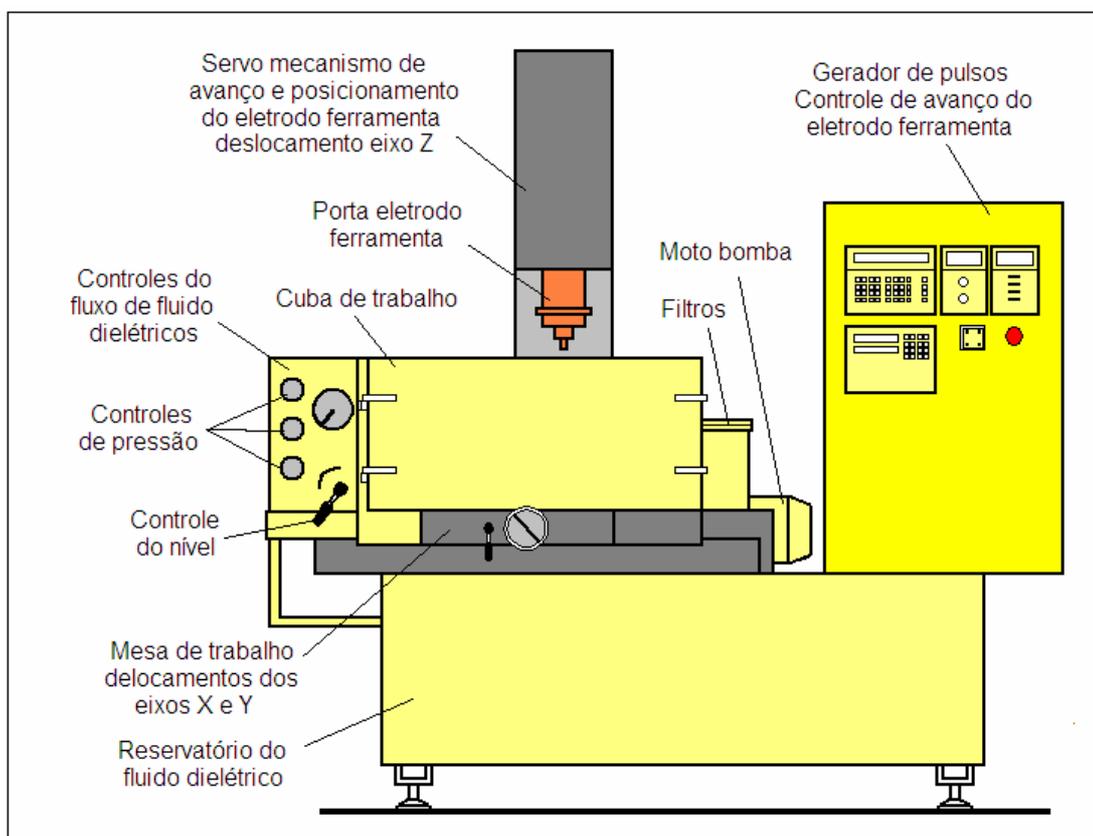


Figura 6: Desenho esquemático de uma máquina de eletroerosão por penetração (ENGEMAQ, 2002).

► O mecânico é responsável pelo movimento relativo entre os eletrodos ferramenta e peça, composto por três elementos. O primeiro, a mesa de trabalho, que posiciona a peça em relação aos eixos X e Y. O segundo, o servo mecanismo de avanço e posicionamento do eletrodo ferramenta, responsável por manter a distância adequada da fenda de trabalho entre os eletrodos ferramenta e peça, o eixo Z. O último, a própria estrutura da máquina.

As máquinas modernas possibilitam a instalação de um cabeçote que possui até quatro eixos programáveis X-Y-Z-C, esse último eixo (C) é responsável pela rotação do eletrodo ferramenta em torno do eixo Z, como mostra a figura 7:

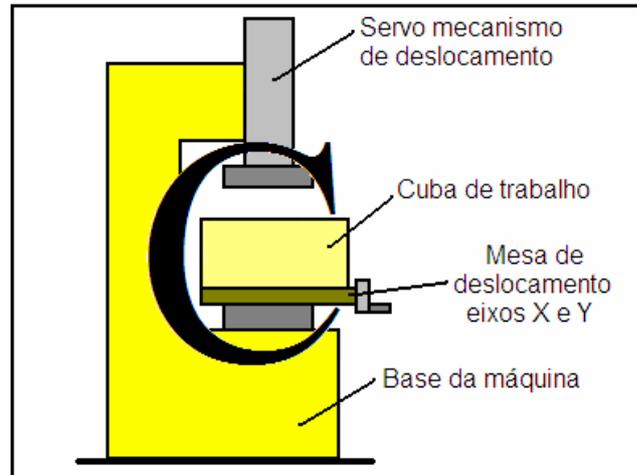


Figura 7: Desenho esquemático ilustrando o quarto eixo "C", da máquina EDM (JAMESON, 2001).

- ▶ O elétrico é composto pelo gerador de pulsos estáticos, sistemas de controle do avanço proporcional do eletrodo ferramenta e pelos cabos de alimentação de energia;
- ▶ O dielétrico é constituído pelo reservatório, cuba de trabalho e moto bomba, encarregada da alimentação do fluido dielétrico durante o processo de usinagem e filtros, responsáveis pela limpeza do fluido.

2.3 Mecanismo de remoção do material

Dois eletrodos, anodo e catodo, um deles a ferramenta de forma predeterminada, outro a peça, submersos em um fluido dielétrico, sofrem uma série de pulsações de voltagem, normalmente de forma retangular, com magnitude de aproximadamente 80 a 120 V (às vezes mais alta) e frequência da ordem de 5 kHz, aplicada entre os dois eletrodos, separados por uma pequena fenda de trabalho de 0,01 a 0,50 mm. A aplicação dessa voltagem pulsada dá lugar a um desarranjo elétrico na região da fenda, produzindo aceleração de elétrons contra o anodo e de íons positivos contra o catodo. A figura 8 ilustra o fluxo natural de elétrons atraídos pelo anodo, de polaridade positiva e íons positivos atraídos pelo catodo, de

polaridade negativa através da coluna ionizada (canal de plasma) dentro do fluido dielétrico.

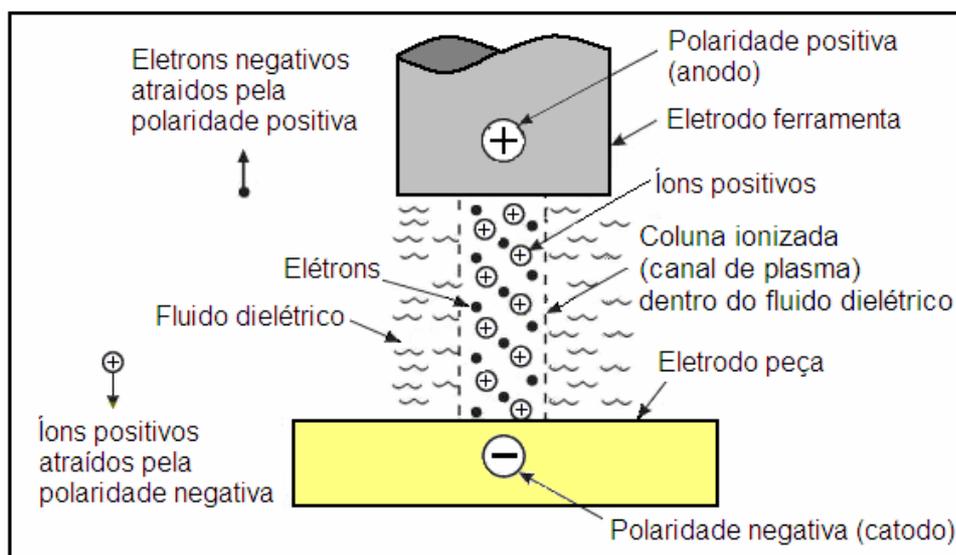


Figura 8: Fluxo natural de elétrons e íons positivos através da coluna ionizada (JAMESON, 2001).

Os elétrons colidem ainda com átomos neutros do dielétrico e criam, respectivamente, íons positivos e elétrons adicionais que, acelerados, colidem contra as superfícies dos eletrodos peça e ferramenta, transformando a energia cinética em térmica, na forma de calor. Temperaturas atingem a ordem de 8.000 a 12.000 °C, de tal forma que a faísca com tempo de duração pequeno (0,1 a 2.000 micro-segundos) eleva a temperatura na superfície dos eletrodos acima do ponto de ebulição. A evaporação do dielétrico promove uma redução da pressão na região do canal de plasma, que tem sua pressão reduzida bruscamente, e o metal superaquecido transforma-se em vapor por sublimação. Portanto, a colisão de elétrons e íons é o agente que causa a elevada geração de calor concentrada, preferencialmente, nos picos da topografia da superfície.

O canal de plasma tem largura e densidade aumentadas em função do tamanho da folga entre os eletrodos ferramenta e peça.

Considerando que a remoção de material é efetuada pela ação das descargas elétricas, a taxa de usinagem não é influenciada pela dureza da peça. A taxa de remoção pode subir com o aumento da corrente e da frequência da centelha, o que afeta diretamente o valor de rugosidade da peça.

Muitas teorias sobre o fenômeno de eletroerosão foram formuladas, porém, a teoria termoelétrica apresenta-se atualmente com as melhores explicações sobre o fenômeno de remoção de material por descargas elétricas segundo Kahng (1977), citado por Silva (2006).

Segundo Descoedres (2006), o fenômeno é subdividido em cinco fases como mostra a figura 9: ocorre a pré-ignição, a voltagem é aplicada entre os eletrodos ferramenta e peças, em 9(a). Com a desagregação dielétrica, ocorre formação do canal de plasma, em 9(b). Descarga, aquecimento fusão e vaporização dos materiais das superfícies dos eletrodos, em 9(c). Fim do canal de plasma, implosão do canal e remoção do material aquecido nas superfícies, em 9(d). Limpeza, solidificação das partículas erodidas que são removidas pelo dielétrico, em 9(e). Essas fases estão diretamente relacionadas aos tempos de aplicação de tensão e de corrente.

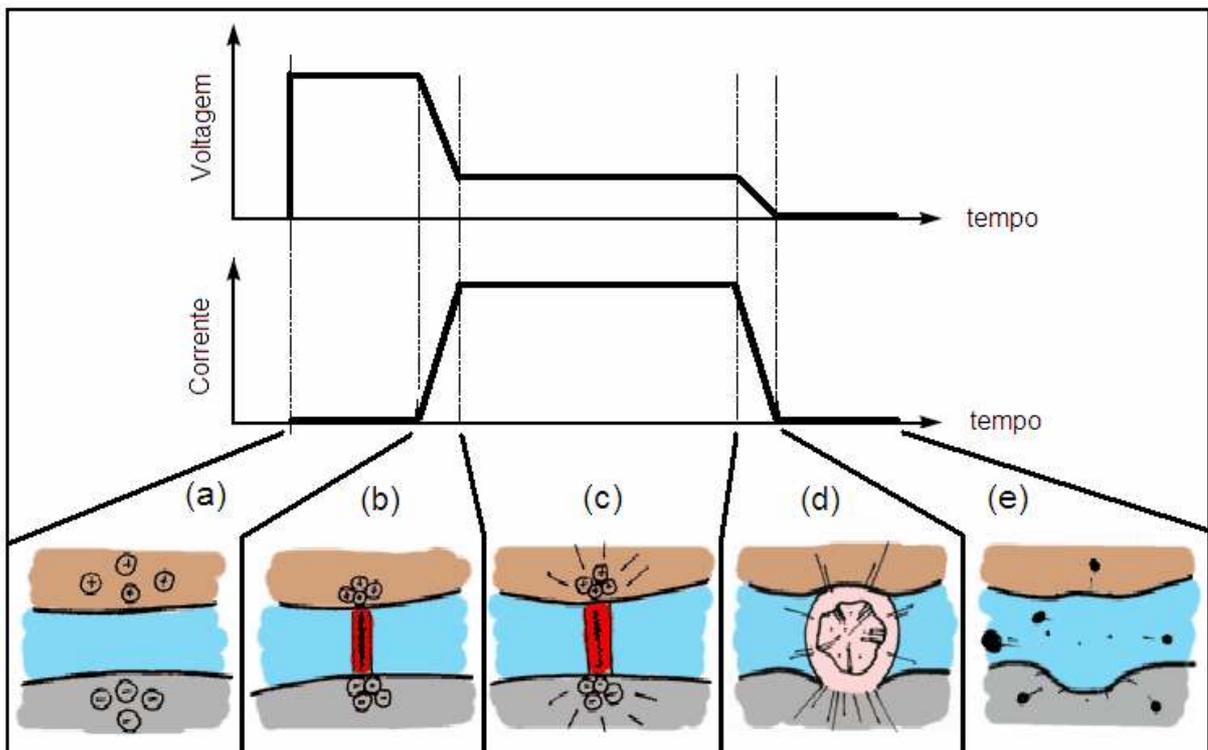


Figura 9: Fases da descarga elétrica (DESCOEUDRES, 2006).

Para Benedict (1987), quando o pulso de eletricidade da corrente contínua é entregue aos eletrodos ferramenta e peça, um campo elétrico intenso é criado nos pontos onde existem as maiores irregularidades nas superfícies, figura 9(a). Logo em seguida, partículas negativamente carregadas são emitidas e começam a migrar, resultando na formação de uma ponte de elevada condutividade, figura 9(b). A temperatura do material aumenta na região da ponte, bem como, numa parcela pequena das partículas fluídas carregadas no interior do dielétrico, ocorre, então, a formação da faísca entre as duas superfícies, figura 9(c). Nesse momento, a tensão diminui e a corrente aumenta, aumentando-se a temperatura e a pressão no canal de plasma. Uma bolha se expande rapidamente para fora do canal. Quando o pulso elétrico termina, a ação da faísca aquece imediatamente e a bolha do vapor entra em colapso, figura 9(d). O fluido dielétrico retira o metal derretido das superfícies. Como resultado, forma-se uma pequena cratera em ambas as superfícies. Em seguida, as pequenas partículas solidificam-se e o líquido dielétrico age para remover essas partículas localizadas na fenda de trabalho, figura 9(e). Essa seqüência ocorre em um período de micro-segundos.

Dois períodos de tempos são de fundamental importância para o perfeito funcionamento do processo, o tempo de descarga, chamado de T_{on} e o tempo de intervalo T_{off} . A duração desses períodos é da ordem de μs (micro-segundos). No tempo T_{on} , a voltagem entre peça e ferramenta forma um canal de plasma, onde elétrons e íons circulam livremente, entre os eletrodos peça e ferramenta. No instante em que a voltagem é desligada, automaticamente, pelo sistema de funcionamento da máquina, o canal de plasma desfaz-se e neste instante a corrente passa através do fluido entre peça e ferramenta e os elétrons e íons se chocam contra as superfícies dos eletrodos peça e ferramenta. Logo em seguida, começa o tempo T_{off} , durante o qual as partículas dos materiais que foram arrancadas pela descarga são arrastadas pelo fluido dielétrico. A figura 10 ilustra a formação do canal de plasma durante o tempo T_{on} e o final do canal no tempo T_{off} . Shumacher (2003) considera a ocorrência de três fases importantes durante o procedimento da descarga elétrica, fase da preparação para a ignição 10(a), fase da descarga 10(b) e fase do intervalo entre descargas 10(c).

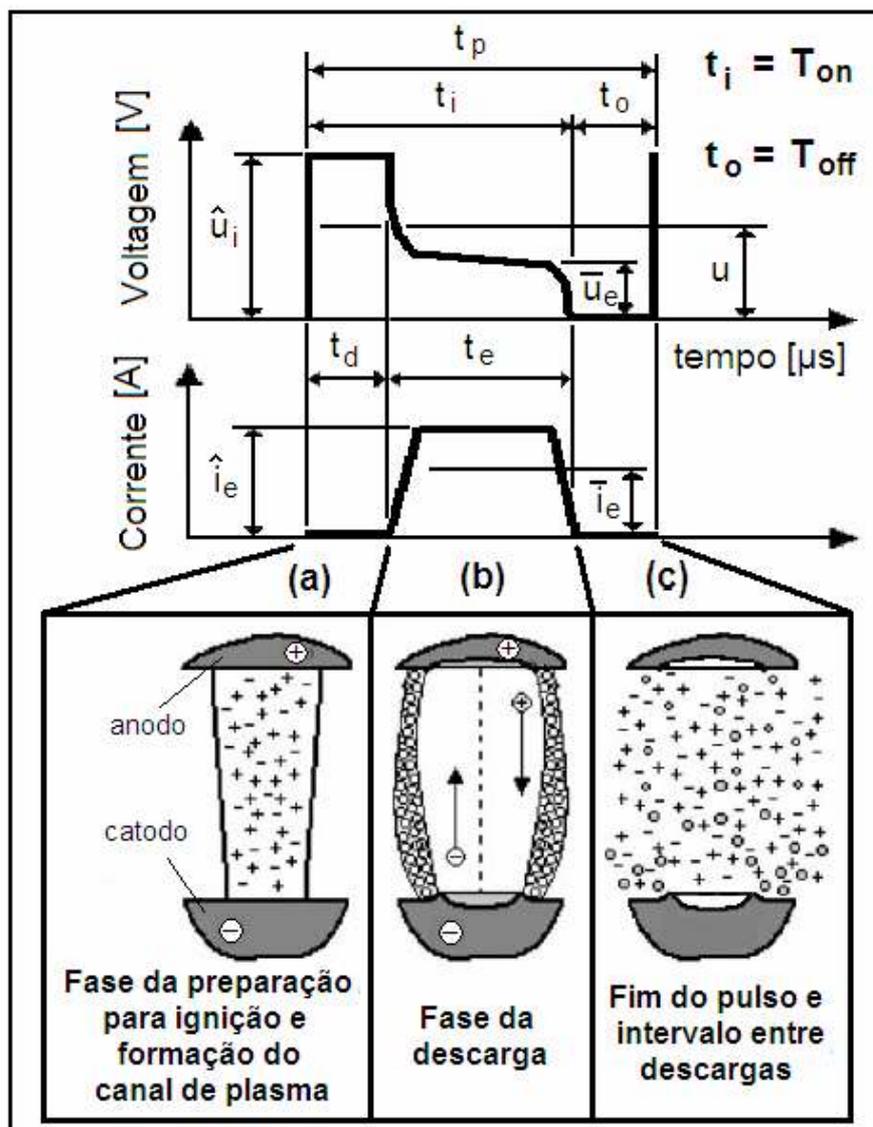


Figura 10: Tempos T_{on} e T_{off} durante o procedimento da descarga elétrica (FERREIRA, 2006).

2.4 Parâmetros do processo

De acordo com Amorim (2002), a norma VDI 3402, de 1990, estabelece e define os principais parâmetros elétricos de controle do processo de EDM (eletroerosão), conforme evolução da tensão e corrente elétricas durante a descarga de uma faísca, apresentando-se em destaque os principais parâmetros de controle do processo como mostra a figura 10.

\hat{u}_i – tensão em aberto [V] – tensão na fenda de trabalho quando não há fluxo de corrente;

\bar{u}_e – tensão média da descarga [V] – representa a tensão na fenda no decorrer de uma faísca elétrica;

u – tensão média de trabalho [V] – significa a média aritmética da tensão na fenda de trabalho durante uma operação de usinagem;

t_d – tempo de retardo de ignição [μ s] – intervalo de tempo desde a aplicação da tensão em aberto \hat{u}_i até o início da descarga;

t_e – duração da descarga [μ s] – período de tempo decorrido após o rompimento da rigidez do dielétrico quando ocorre o fluxo efetivo de corrente;

t_i – duração do pulso de tensão [μ s] – representa o tempo de aplicação de tensão na fenda de trabalho, correspondendo à soma do tempo de ignição t_d mais a duração da descarga t_e ;

t_o – tempo de intervalo entre dois sucessivos pulsos de tensão t_i [μ s];

t_p – tempo de período do ciclo de uma descarga [μ s] – representa a soma da duração do pulso de tensão t_i mais o tempo de intervalo t_o ;

\hat{i}_e – corrente máxima durante a descarga [A];

\bar{i}_e – corrente média durante a descarga [A];

τ – relação de contato representa a razão entre o tempo de pulso t_i e o tempo de período do ciclo da descarga t_p .

Esses parâmetros podem ser regulados dentro de uma ampla faixa de variação em função do tipo da máquina de EDM.

A energia da descarga, que significa a energia fornecida por uma faísca à fenda de trabalho, é representada por: $W_e \approx u_e \cdot \bar{i}_e \cdot t_e$ [J] e determina o volume de material removido por descarga e também a qualidade do acabamento superficial.

2.5 Principais aspectos avaliados após o processo

Segundo Amorim (2002), para avaliação do rendimento tecnológico do processo, usualmente, são quantificados os seguintes aspectos:

V_w – taxa de remoção de material – caracteriza o volume de material que é removido do eletrodo peça pelo tempo de usinagem [mm^3/min];

V_e – taxa de desgaste – representa o volume de material que é removido do eletrodo ferramenta pelo tempo de usinagem [mm^3/min];

ϑ – desgaste relativo representa o desgaste volumétrico relativo entre os eletrodos ferramenta e peça, dado pela razão entre V_e e V_w , equação (1), normalmente expressa em valores percentuais.

$$\vartheta = \frac{V_e}{V_w} \cdot (100) \quad [\%] \quad (1)$$

onde:

V_e = taxa de desgaste [mm^3/min];

V_w = taxa de remoção de material [mm^3/min].

A qualificação da textura superficial das peças usinadas por eletroerosão é analisada usualmente pelos parâmetros de rugosidade R_a e R_z [μm].

Esses aspectos são influenciados pelos ajustes operacionais da máquina, bem como tempo de duração dos períodos de trabalho e intervalo, intensidade da corrente, magnitude da voltagem, frequência de voltagem, condição de polaridade dos eletrodos (positivo para a ferramenta e negativo para a peça ou vice versa), tamanho da fenda de trabalho, material do eletrodo ferramenta e tipo de fluido dielétrico.

A taxa de remoção de material do eletrodo peça trata-se da quantidade de material retirada da peça durante o processo, geralmente medida em volume por tempo, taxas maiores são obtidas em etapas de desbaste severo onde não se tem uma devida preocupação com a integridade da superfície da peça e menores taxas quando se trata de acabamento final.

A taxa de desgaste do eletrodo ferramenta fornece a quantidade do desgaste da ferramenta. Muito importante para o processo, pois o ideal seria um desgaste zero. Porém, isso não é possível já que a superfície do mesmo também é bombardeada no momento de formação ou degeneração do canal de plasma.

Considerando-se o desgaste relativo, quanto menor seu valor, melhor para o processo, já que ele relaciona a taxa de desgaste do eletrodo ferramenta com a taxa de remoção de material do eletrodo peça. Valor pequeno resulta em um alto valor da quantidade de material retirada da peça com pouco desgaste da ferramenta.

A integridade superficial da peça fica comprometida após o processo, já que a mesma sofre ataque de íons e/ou elétrons que promovem a retirada do material através de explosões não controladas (aleatórias). Não existe um padrão definido da quantidade de material removido. Sabe-se, apenas, que maior intensidade de corrente em períodos longos e fendas de trabalho de maiores distância produzem explosões mais intensas, conseqüentemente, uma maior remoção de material, promovendo uma textura mais grosseira. Além disso, ocorre formação de uma camada chamada de zona branca, localiza na superfície da peça e outra chamada de zona termicamente afetada pelo calor, que se localiza pouco abaixo da zona branca entre a mesma e o substrato da peça. Ocorre também o surgimento de micro-trincas e poros na superfície da peça erodida, além da adesão de partículas erodidas sobre a superfície da mesma.

2.6 A influência dos parâmetros do processo

Segundo Amorim (2002), a fim de se obter uma aplicação eficiente do processo de usinagem por eletroerosão, é fundamental conhecer, além do princípio físico de remoção de material, os seguintes aspectos:

- ▶ a tecnologia do processo em termos dos parâmetros elétricos de controle do gerador e suas relações;
- ▶ as diferentes formas de lavagem da fenda de trabalho;
- ▶ os principais materiais para eletrodos ferramenta;
- ▶ a escolha adequada da polaridade dos eletrodos.

No estabelecimento adequado dessas variáveis, pode-se conseguir uma assimetria adequada da remoção de material do anodo e do catodo e, também, um comportamento equilibrado da fenda de trabalho, resultando em condições estáveis

de eletroerosão, possibilitando a ausência ou a diminuição da ocorrência de arcos e curtos-circuitos e, conseqüentemente, melhor rendimento do trabalho da usinagem.

A tensão média de trabalho e a tensão em aberto influem diretamente na dimensão da fenda de trabalho. Tensão em aberto significa que não flui corrente entre eletrodos peça e ferramenta. Nas máquinas modernas de eletroerosão, é possível ajustar-se indiretamente a tensão média de trabalho, estabelecendo, no sistema de controle da máquina, uma grandeza chamada de tensão de referência, que significa a tensão desejada para a tensão média de trabalho. Durante a usinagem, o sistema de controle adaptativo atua sobre o avanço do eletrodo ferramenta no sentido de manter a tensão de referência programada e, portanto garantir o equilíbrio adequado da dimensão da fenda de trabalho (Amorim, 2002). Com a elevação da tensão média de trabalho, ocorre o aumento da abertura da fenda de trabalho, proporcionando boas condições de remoção das partículas erodidas.

A máquina de eletroerosão por penetração pode trabalhar tanto com polaridade positiva quanto com negativa, dependendo da aplicação, porém a maioria das operações são realizadas com polaridade positiva no eletrodo ferramenta com a finalidade de proteger o mesmo contra desgaste excessivo (Guitrau, 1997).

Segundo Amorim (2002), a compreensão do comportamento do fenômeno da fusão de material em ambos, anodo e catodo, com a progressão da duração da descarga elétrica, é importante para entender-se a influência da polaridade dos eletrodos sobre a taxa de remoção e sobre o desgaste relativo, sendo possível com isso escolher-se adequadamente a polaridade do eletrodo ferramenta.

No instante inicial da descarga, ocorre primeiramente a fusão contínua de material do anodo, promovida pela alta mobilidade dos elétrons que transforma sua energia cinética em calor ao serem absorvidos pelo material. Após alguns microssegundos, ocorre um aumento do diâmetro do canal de plasma na região próxima ao anodo, causando um decréscimo do fluxo de energia sobre a superfície. O material fundido da cavidade anódica começa a solidificar-se. Já do lado do catodo, a fusão de material inicia-se aproximadamente após o dobro do período de tempo observado para a fusão de material no anodo, isto por causa da menor mobilidade dos íons positivos em relação aos elétrons, a figura 11 ilustra esta condição.

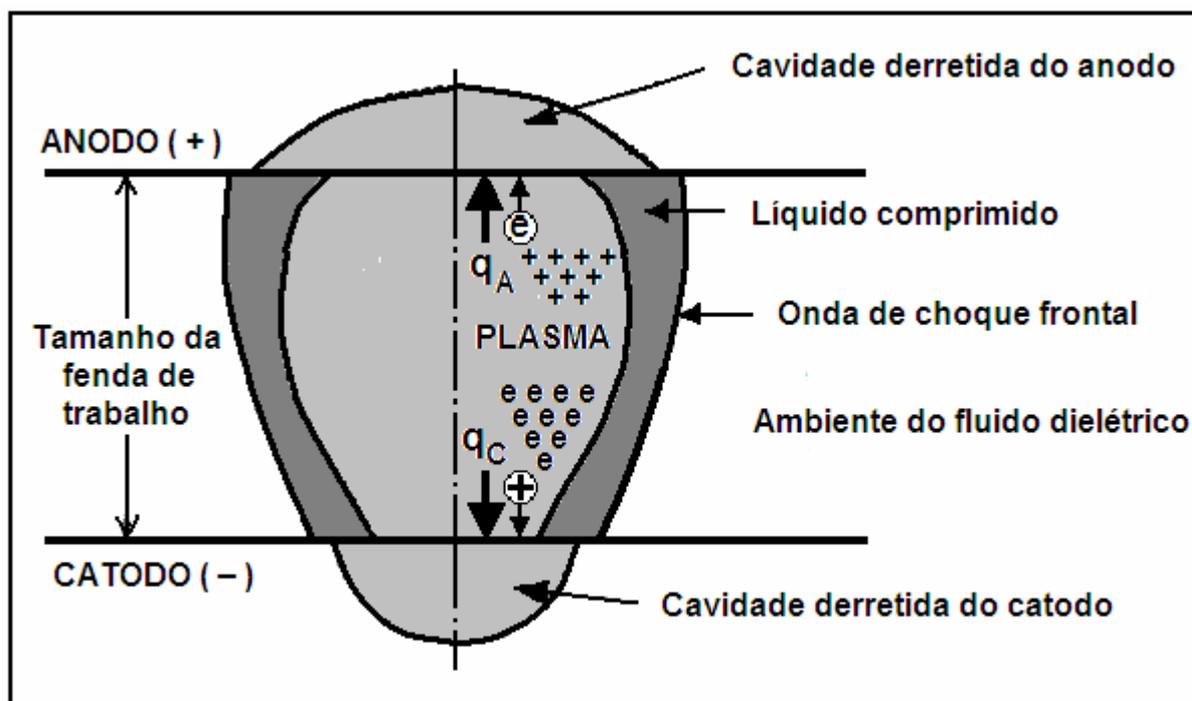


Figura 11: Desenho esquemático da configuração do canal de plasma e o derretimento das cavidades anódica e catódica (DIBITONTO, 1989).

Segundo DiBitonto (1989), a densidade e a viscosidade do fluido restringem o crescimento do canal de plasma. Densidade é a relação entre massa e volume, seu valor depende da concentração de nucleons, isto é, prótons e nêutrons, num determinado volume.

Para Schulze (2003), o tamanho e mobilidade da bolha de gás, ao redor do canal de plasma, diminuem com maiores viscosidades.

De acordo com Yih-fong (2005), a densidade do fluido dielétrico influencia o tamanho da fenda de trabalho. A figura 12 ilustra esquematicamente essa variação, em 12(a) um fluido com densidade normal e em 12(b) um fluido com maior densidade, devido à concentração de micro partículas.

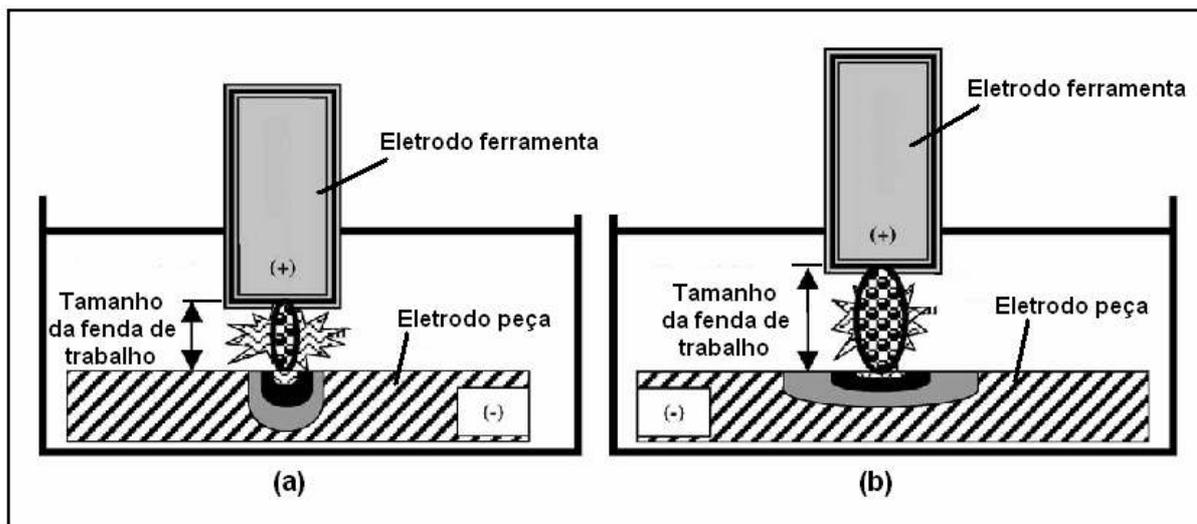


Figura 12: Desenho esquemático representando o tamanho da fenda de trabalho em função da densidade do fluido dielétrico, (a) menor densidade e (b) maior densidade (Yih-fong, 2005).

A figura 13 ilustra uma foto obtida por meio de câmera de alta velocidade, confirmando o formato do canal de plasma. Em 13(a), a pré-ignição, em 13(b), o início da formação da faísca e, em 13(c), a faísca. Do lado esquerdo, o catodo, e, no direito, o anodo, separados por uma fenda de trabalho de 18 μm .

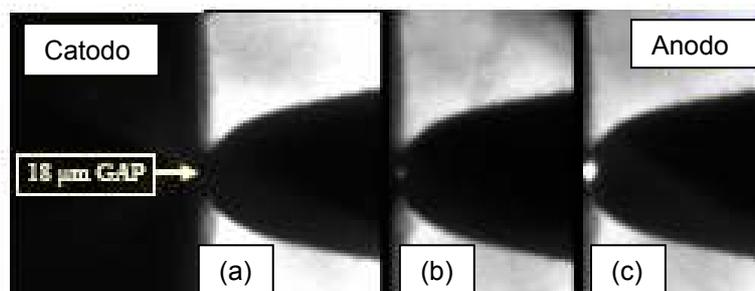


Figura 13: Foto do canal de plasma durante a pré-ignição (a) e descarga (c) (SCHULZE, 2001).

A fusão da cavidade catódica é retardada em relação à anódica devido à menor mobilidade dos íons positivos. Logo, a taxa de erosão do anodo difere do catodo, conforme o tempo de duração do pulso t_i (T_{on}). Para tempos curtos como 0,5 μs , as taxas e a erosão podem ser as mesmas, porém, para tempos mais longos como 30 μs , a taxa de remoção de material tende a ser maior que o desgaste do eletrodo ferramenta, para a condição de usinagem, com eletrodo ferramenta de

cobre, com polaridade positiva, e eletrodo peça de aço, com polaridade negativa, conforme foi observado por DiBitonto (1989), ilustrado na figura 14.

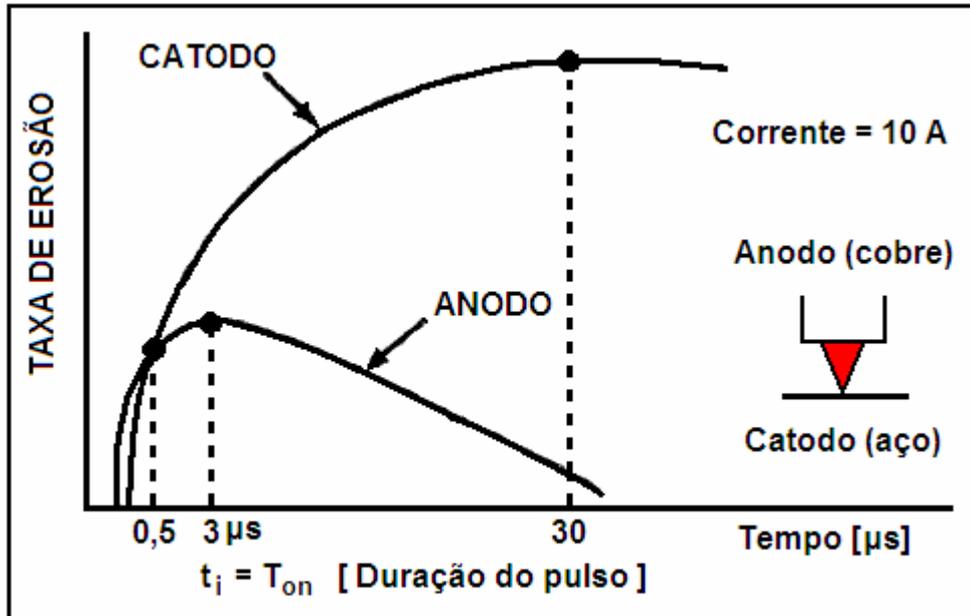


Figura 14: Diferença entre as taxas de erosão do anodo e catodo em relação ao tempo de duração do pulso – sem escala (DIBITONTO, 1989).

Em situações de desbaste, a corrente alta é aconselhável para propiciar uma maior retirada de material, porém com maiores danos para a superfície da peça. Já na condição de acabamento, deve-se fazer o oposto, baixa corrente, menor retirada de material com melhor acabamento superficial.

A frequência é usada para medir o número de vezes que os tempos T_{on} e T_{off} estão ligados e/ou desligados. Nas operações de desbaste, deve-se utilizar uma frequência baixa, para que o tempo T_{off} seja suficiente longo, possibilitando que o fluido dielétrico remova todas as partículas erodidas. Já nas operações de acabamento, o contrário é o adequado.

Segundo Silva (2006), a relação de contato é dada pela razão entre a duração do pulso ($t_i = T_{on}$) e pela duração do período da descarga ($t_p = T_{on} + T_{off}$), resultando na equação (2):

$$\tau = \frac{t_i}{t_p} = \frac{T_{on}}{(T_{on} + T_{off})} \quad (2)$$

onde:

$t_i = T_{on}$ = duração do pulso [μs];

$t_p = T_{on} + T_{off}$ = duração do período da descarga [μs].

Para se obter uma maior relação de contato, basta reduzir o tempo de intervalo entre as descargas ($t_o = T_{off}$), mantendo constante a duração das descargas (t_e). Como resultado, tem-se o aumento da frequência de descargas, promovendo uma maior taxa de remoção de material (V_w) e, em contrapartida, um menor desgaste volumétrico relativo (ϑ). Deve-se ter cautela quanto aos intervalos muito curtos entre as descargas, que podem ocasionar uma alta contaminação da abertura de trabalho, gerando arcos e curtos circuitos, que deixam o processo instável.

2.7 Fluido dielétrico

Segundo Fuller (1989), o fluido dielétrico tem um papel fundamental no processo ao controlar a potência de abertura da descarga. O fluido pode ser querosene, hidrocarbono aditivado (ambos derivados do petróleo), água deionizada ou certas soluções aquosas. Os hidrocarbonos recebem esse nome devido à sua cadeia de componentes, que são basicamente carbono e hidrogênio.

O fluido dielétrico deve possuir uma alta força dielétrica para permanecer não condutor eletricamente até que a voltagem de desequilíbrio seja alcançada e deve ionizar-se rapidamente depois que a descarga acontece, além de estar habilitado a suportar a repetição das centelhas estabelecidas. Deve possuir também uma boa capacidade de refrigeração com baixa viscosidade, o que permite a retirada dos resíduos de usinagem para fora da região da fenda de trabalho entre os eletrodos ferramenta e peça (McGeough, 1988). A figura 15 ilustra essas três funções do dielétrico de acordo com Sommer (2007).

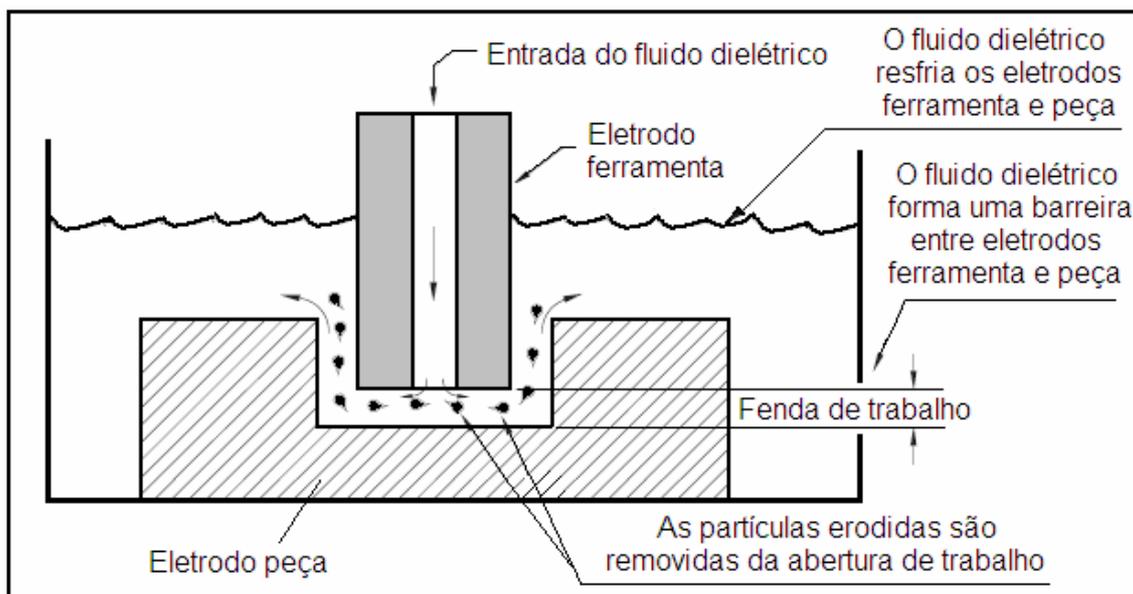


Figura 15: Principais funções do fluido dielétrico (SOMMER, 2007).

No início do processo, o dielétrico está livre de partículas erodidas, neste momento, seu poder de permanecer não condutor é alto, e a ignição demora a acontecer, porém, à medida que o processo ocorre, as partículas que são arrancadas do material passam a ser prejudiciais, causando descargas não desejadas que se tornam arcos com danos conseqüentes para eletrodos peça e ferramenta.

Para Jameson (2001), além das três funções, já citadas, o fluido dielétrico também tem influência sobre o resfriamento do material vaporizado dos eletrodos peça e ferramenta, bem como a solidificação do mesmo em forma de partículas.

Segundo Arantes (2003), para que o fluido dielétrico possa cumprir bem suas funções, ele deve ser avaliado em relação às seguintes propriedades ou fatores:

- ▶ Rigidez dielétrica – ou resistividade, é a medida da capacidade de insulação de um fluido para EDM. Maior rigidez implica menor distância entre ferramenta e peça, com conseqüente aumento da precisão de usinagem.
- ▶ Tempo de deionização – é o tempo para íons e elétrons se recombinarem depois de uma descarga. Quanto menor, menor é o tempo T_{off} necessário entre os pulsos subseqüentes. Essa característica evita a formação de curtos-circuitos.

- ▶ Viscosidade – é a medida da resistência ao escoamento do fluido. Menor viscosidade, melhor escoamento, principalmente em cavidades profundas. Segundo Jameson (2001), baixa viscosidade é uma qualidade desejável em um fluido dielétrico, ela ajuda o fluxo mais fácil do fluido entre as descargas.
- ▶ Calor específico – quanto maior, mais energia térmica pode acumular sem grande aumento na temperatura, melhorando o rendimento do processo e a vida do fluido dielétrico. O elevado crescimento da temperatura aumenta a difusão de átomos da peça para o fluido, o que pode causar alterações significativas na estrutura do material usinado, além do aparecimento de uma maior quantidade de micro trincas.
- ▶ Condutividade Térmica – quanto maior, menor é o tempo necessário para solidificar e refrigerar as gotas de metal expelidas da zona de erosão. Isso reduz a possibilidade de partículas se aderirem ao eletrodo ou re-depositarem na superfície da peça.
- ▶ Ponto de Ebulição – quanto maior, mais estável se mantém o fluido em temperaturas elevadas sem perder suas propriedades originais, perdendo frações menores de componentes pela evaporação seletiva das frações mais voláteis.

2.8 Limpeza da fenda de trabalho

No processo de eletroerosão, a limpeza, ou seja, a passagem do dielétrico entre os eletrodos ferramenta e peça, é fundamental para o bom desempenho do trabalho (ENGEMAQ, 2002).

No início da usinagem, o dielétrico encontra-se limpo, isento de partículas removidas das superfícies e resíduos de carbonatos resultante da queima do dielétrico. Se ocorrer um acúmulo de partículas, em certos pontos da fenda de trabalho, ocorre uma diminuição na resistência que facilita a formação de descargas anormais que podem formar arcos e danificar os eletrodos peça e ferramenta.

O sistema de limpeza é importante, porque remove as partículas erodidas da fenda de trabalho. Se elas não forem afastadas, podem provocar o aparecimento de arcos devido à corrente elétrica que passa através dessas partículas. Podem

prejudicar ainda mais o acabamento superficial da peça (Sommer, 2007). Alguns sistemas de limpeza são mostrados a seguir.

► Limpeza sobre pressão com alimentação pelo eletrodo ferramenta.

A figura 16 ilustra o sistema de limpeza sobre pressão com alimentação pelo eletrodo ferramenta. O fluido dielétrico entra sobre pressão pelo interior do eletrodo, com uma pressão que varia entre 3 a 5 psi e sai pela fenda lateral entre os eletrodos ferramenta e peça.

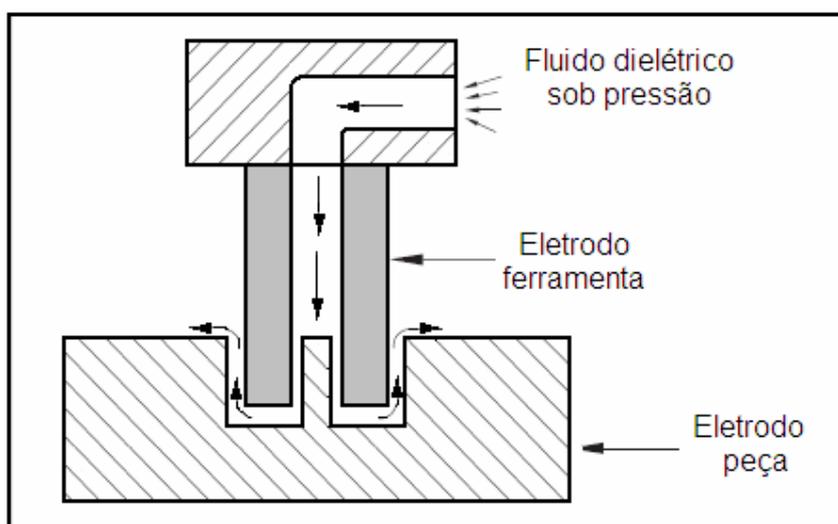


Figura 16: Sistema de limpeza das partículas erodidas sobre pressão (SOMMER, 2007).

Nesse sistema, de acordo com Silva (2006), pode ocorrer o problema de conicidade na cavidade usinada como mostra a figura 17. As partículas erodidas, em A, são forçadas a saírem da fenda de trabalho, seguindo um caminho passando pelo ponto B. A concentração dessas partículas, em B, pode produzir descargas indesejáveis, provocando conicidade na cavidade usinada. À medida que as partículas saem da cavidade, elas atingem um ponto (C) em que a folga é tanta que não ocorrem mais as descargas laterais e a cavidade deixa de ser cônica. Essas descargas laterais provocam também a chamada erosão secundária que deforma a cavidade, figura 18. Uma maneira de contornar esses problemas é usar a regulagem da pressão de entrada do fluido dielétrico pelo operador, o que pode reduzir as descargas laterais.

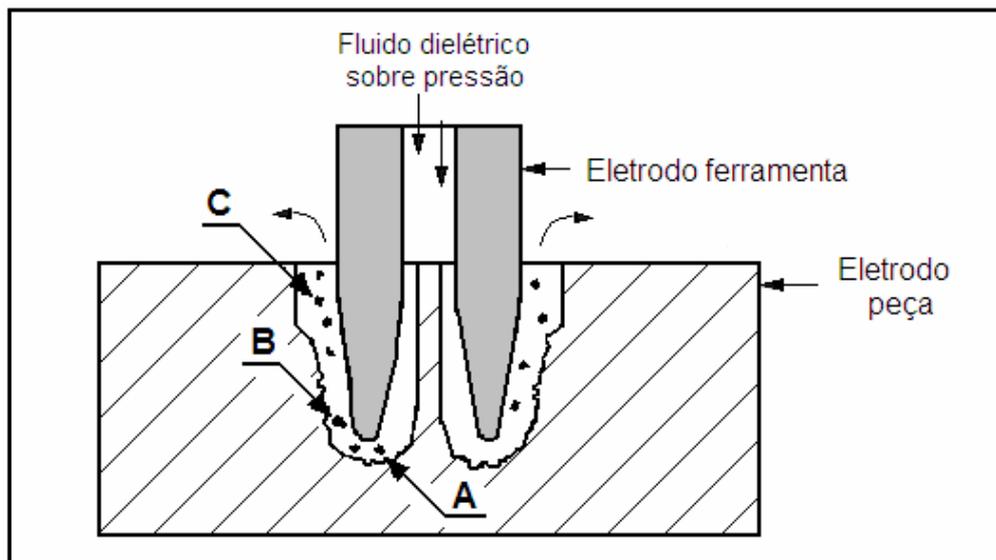


Figura 17: Problema de conicidade na cavidade erodida (SILVA, 2006).

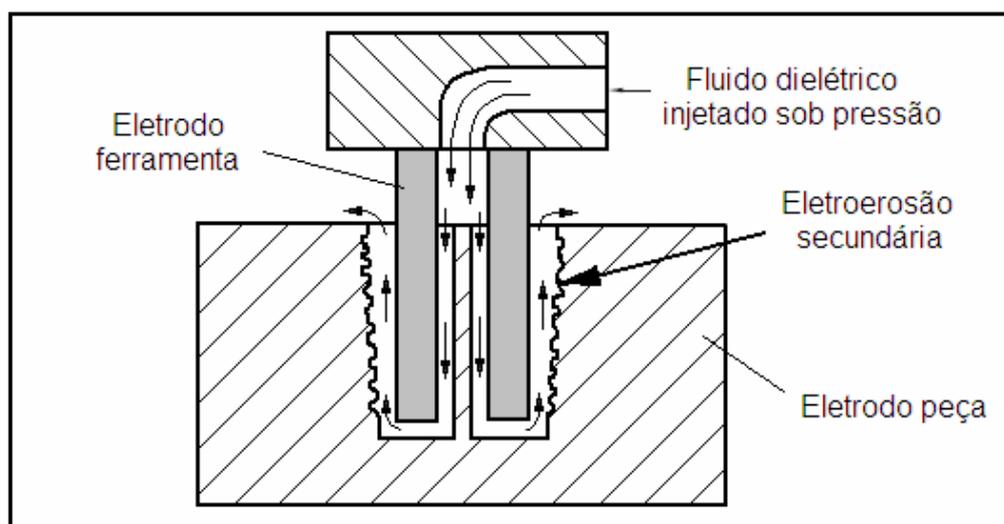


Figura 18: Erosão secundária na cavidade erodida (SOMMER, 2007).

Outro problema, provocado pela lavagem por pressão através do eletrodo, segundo Amorim (2002), é a deformação do fundo da cavidade, como ilustrado na figura 19. Esse problema ocorre devido à concentração de impurezas na região de saída do fluido dielétrico, contaminado pelas partículas erodidas. Ele entra limpo e sai contaminado. Essas partículas produzem uma maior quantidade de faíscas nesta região. A figura 19 combina um gráfico que indica o nível de contaminação da fenda de trabalho pelas partículas erodidas.

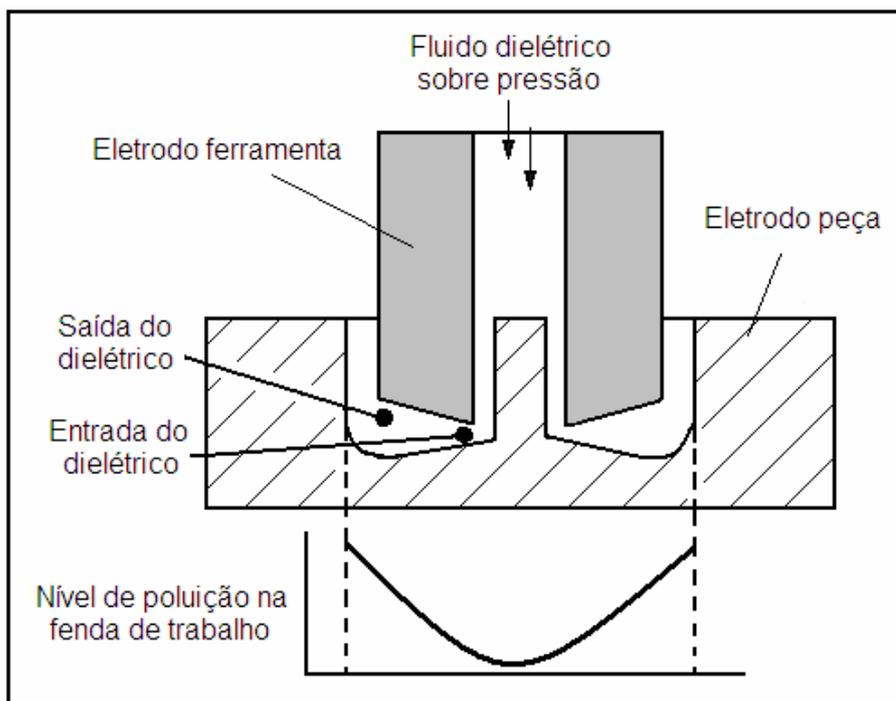


Figura 19: Problema de conicidade na cavidade erodida (AMORIM, 2002).

- Limpeza por sucção com o fluido dielétrico, passando por dentro do eletrodo ferramenta (figura 20).

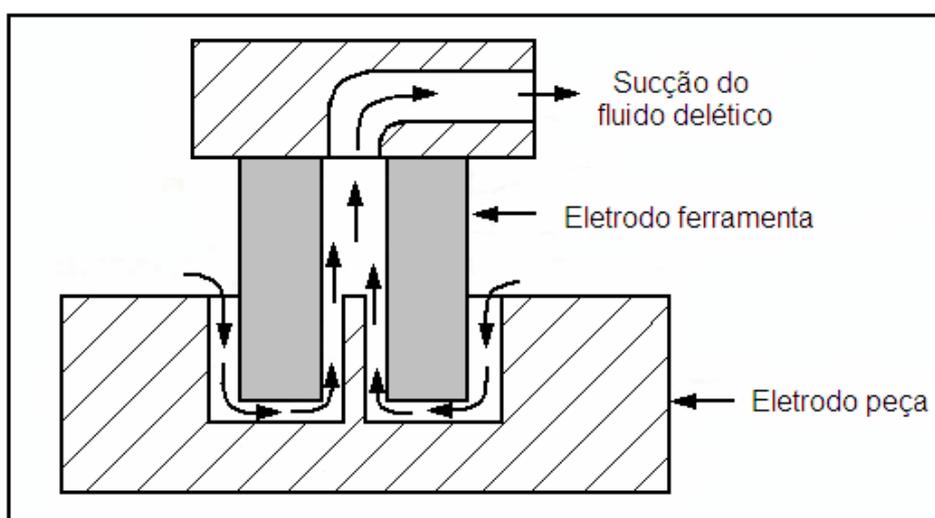


Figura 20: Limpeza por sucção do fluido dielétrico (SOMMER, 2007).

O sistema de limpeza por sucção com o fluido dielétrico, passando por dentro do eletrodo ferramenta, reduz o efeito da usinagem secundária e a conicidade na cavidade, porém pode provocar uma deformação no fundo da cavidade, que ocorre devido ao efeito contrário, promovido pela circulação do fluido dielétrico em relação à limpeza sobre pressão. As partículas erodidas, agora, saem por dentro do eletrodo, fazendo um caminho inverso ao da limpeza sobre pressão.

► Limpeza sobre pressão por dentro da peça (figura 21).

O método de limpeza sobre pressão por dentro da peça elimina o furo no eletrodo ferramenta, com a entrada do fluido por um dispositivo ou suporte, que é posicionado na parte inferior da peça.

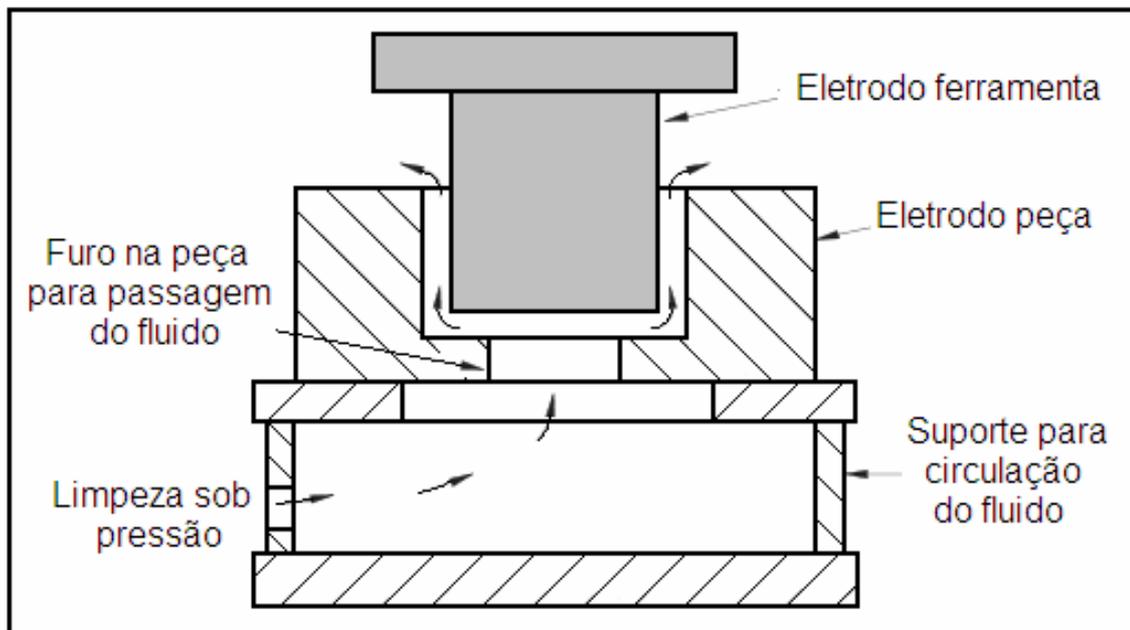


Figura 21: Limpeza sobre pressão por dentro da peça (SOMMER, 2007).

► Limpeza por meio de jato lateral.

No sistema de limpeza, por meio de jato lateral, um bico ou mangueira pode injetar o fluido dielétrico na fenda de trabalho na região lateral entre os eletrodos ferramenta e peça como mostra a figura 22.

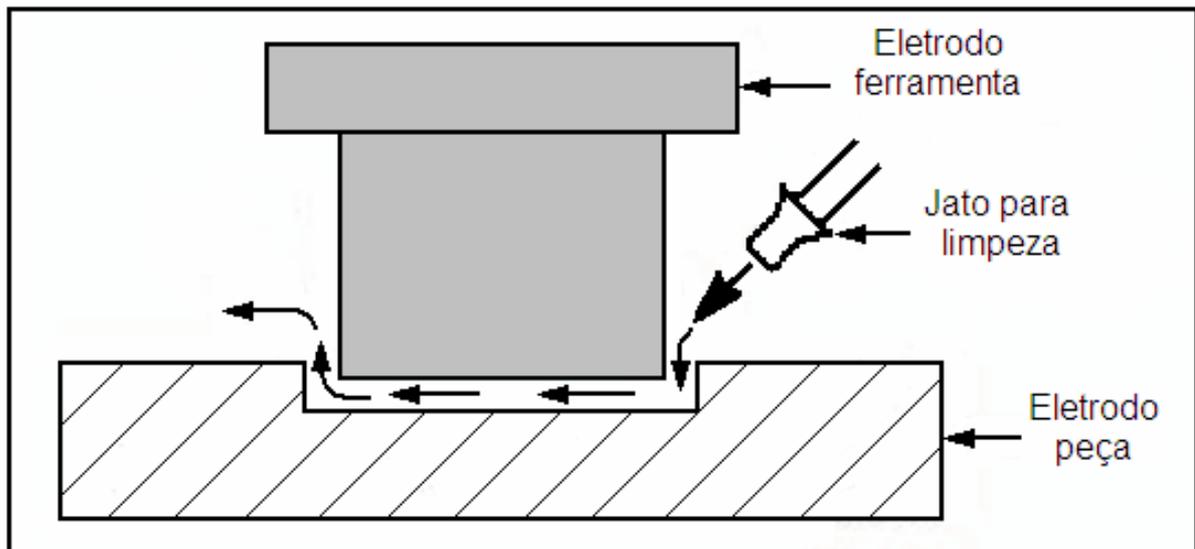


Figura 22: Limpeza por meio de jato lateral (SOMMER, 2007).

► Combinação entre sistemas de limpeza.

Em alguns casos, pode surgir a necessidade da combinação entre os sistemas de limpeza sobre pressão e por sucção quando a peça usinada tem forma muito complexa (Sommer, 2007).

Além dos problemas que ocorrem com limpeza, em virtude do sistema utilizado, a peça pode sofrer o *over-cut*, que é a folga provocada pela usinagem secundária na fenda lateral aberta entre os eletrodos ferramenta e peça. O eletrodo ferramenta tem suas quinas quebradas devido ao desgaste, na região da fenda de trabalho, o que produz cantos arredondados na peça.

2.9 Material do eletrodo ferramenta

Metais com alto ponto de fusão e condutividade elétrica boa são normalmente escolhidos como materiais do eletrodo ferramenta para eletroerosão (McGeough, 1988). Eles devem ser baratos e de fácil fabricação pelos processos de usinagem convencionais.

Teoricamente, as propriedades mecânicas do eletrodo ferramenta têm pouca influência no desempenho da eletroerosão, porém algumas propriedades termo físicas como condutividade térmica e elétrica, expansão térmica e temperaturas de fusão e ebulição, influenciam consideravelmente o desempenho do processo nos aspectos como a taxa de remoção de material, o desgaste do eletrodo e a integridade da superfície da peça.

Como o material do eletrodo ferramenta é responsável pelo transporte da corrente elétrica, ele deve ser condutor de eletricidade. Entre os materiais usados na fabricação de eletrodos ferramenta, pode-se citar: bronze, ligas de cobre-tungstênio, carbeto de tungstênio, ligas de prata-tungstênio, ligas de telúrio-cobre e ligas de cobre-grafita, mas os preferidos são o cobre eletrolítico ou puro e classes especiais de grafita (Amorrim, 2006).

O cobre funciona muito bem como material para eletrodos ferramenta, sendo amplamente utilizado quando são necessários acabamentos muito precisos na superfície da peça. Pode ser usinado por todos os métodos convencionais, como furação, torneamento, fresamento, retificação etc. Mas a usinagem, às vezes, pode ser difícil, porque o cobre tende a aderir à ferramenta de corte e ao rebolo nas operações de retificação. Nesse caso, uma liga de 2% de telúrio-cobre apresenta melhor usinabilidade. Formas complexas podem ser obtidas por eletroerosão a fio em eletrodos de cobre. Outra vantagem do cobre é sua capacidade de ser cunhado, o que o torna um material bom para eletrodos de gravação. Tendo também boa aplicação no campo da engenharia média, devido à sua facilidade de ser altamente polido.

A grafita pode ser encontrada em diferentes classes, desde dimensões grandes de grãos (200 μm), utilizados em operações de eletroerosão de alto

desbaste, a grãos muito finos, para operações de eletroerosão de acabamento, especificamente em aço.

Os custos da grafita variam de econômicos (grãos maiores) a elevados (grãos extrafinos). A grafita apresenta elevada taxa de remoção de material e baixo desgaste do eletrodo ferramenta, dependendo das definições dos parâmetros de eletroerosão, em comparação com eletrodos ferramentas metálicas. A grafita tem menor densidade em relação ao cobre, o que a torna o melhor material para eletrodos grandes. Embora seja muito abrasiva, é relativamente fácil de ser usinada por todos os processos convencionais. A principal desvantagem da grafita é o pó fino que ela produz durante sua usinagem, que é capaz de influenciar o desempenho mecânico e eletroeletrônico da máquina-ferramenta e, quando misturasse com o fluido de corte, age como um composto de lapidação que acaba desgastando componente da máquina-ferramenta. Portanto, é necessário tomar precauções durante a usinagem da grafita.

Na prática, qualquer operação de eletroerosão que puder ser realizada com cobre também pode ser executada com grafita. O resultado final pode ser o mesmo, mas o custo para obtê-lo pode ser muito diferente. A escolha do material do eletrodo dependerá principalmente das dimensões da ferramenta, dos requisitos da peça, do tipo de máquina de eletroerosão e dos métodos de fabricação dos eletrodos.

2.10 Integridade da superfície

Cada faísca, promovida pelo processo de eletroerosão, remove material derretido e evaporado, formando pequenas crateras nos eletrodos peça e ferramenta. A topografia da superfície, produzida pelo processo, assemelha-se a uma superfície completamente cheia de crateras de tamanhos diferentes, como mostra a figura 23, que depende da energia da faísca (Fuller, 1989). Essas crateras geram um acabamento superficial de baixa qualidade, para casos em que a taxa de remoção de material é muito alta, a rugosidade pode variar de 0,2 a 12 μm .

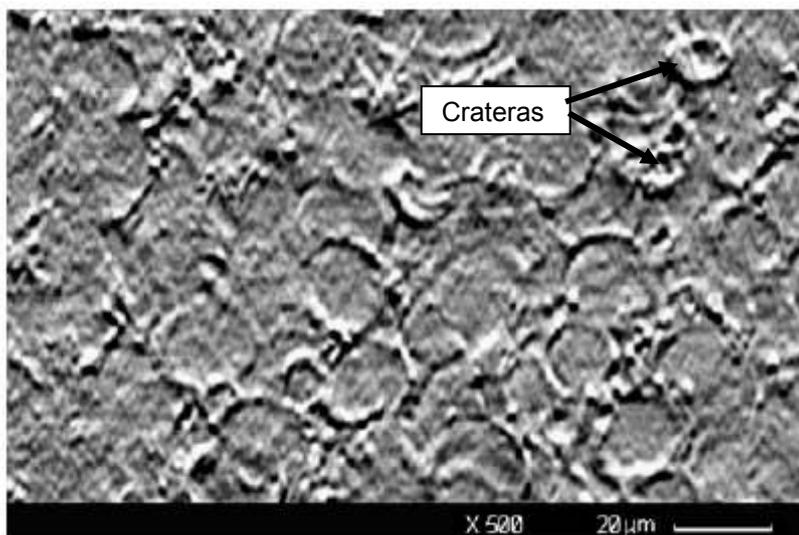


Figura 23: Exemplo de superfícies usinadas pelo processo de eletroerosão (FERREIRA, 2006).

A formação das crateras ocorre principalmente devido à ação da descarga, embora o fluido dielétrico usado possa ter influência nesse fato (McGeough, 1988).

Como a superfície da peça é aquecida pela descarga elétrica e resfriada rapidamente, com a ajuda do fluido dielétrico, uma camada refundida, chamada de zona branca, forma-se nesta região, provocando o aparecimento de poros, tensões térmicas e de micro trincas que nucleiam no contorno de grãos (figura 24), reduzindo, assim, a resistência do material à fadiga. Com isso, a remoção dessa camada é imprescindível para a integridade da peça. Segundo Sales (2007), a zona branca recebe essa denominação por não reagir com as substâncias utilizadas em ataques para revelação de microestruturas.

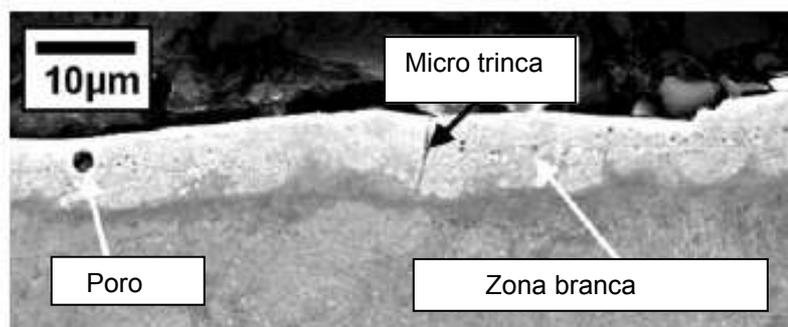


Figura 24: Formação de poros e micro-trincas na camada da zona branca (ASPINHALL, 2000).

Segundo Yoshida (2002), a zona branca, na realidade, é constituída de três camadas justapostas (figura 25), designadas, como segue, da superfície para o núcleo:

1. Zona fundida e re-solidificada – esta região é a que sofreu as mais altas temperaturas. O aço funde e re-solidifica pela ação da extração de calor do dielétrico. Micro estruturalmente, essa camada é bruta de fundição;
2. Zona retemperada – região que atingiu temperaturas superiores às de autenitização, temperando no subsequente resfriamento dado pelo fluido dielétrico. Micro estruturalmente essa região é constituída de Martensita grosseira, devido às temperaturas mais elevadas que as utilizadas em Tratamento Térmico normal;
3. Zona revenida – correspondendo às regiões mais internas da superfície, onde a temperatura superou a utilizada no revenimento normal. Micro estruturalmente, essa região é constituída de Martensita revenida grosseira.

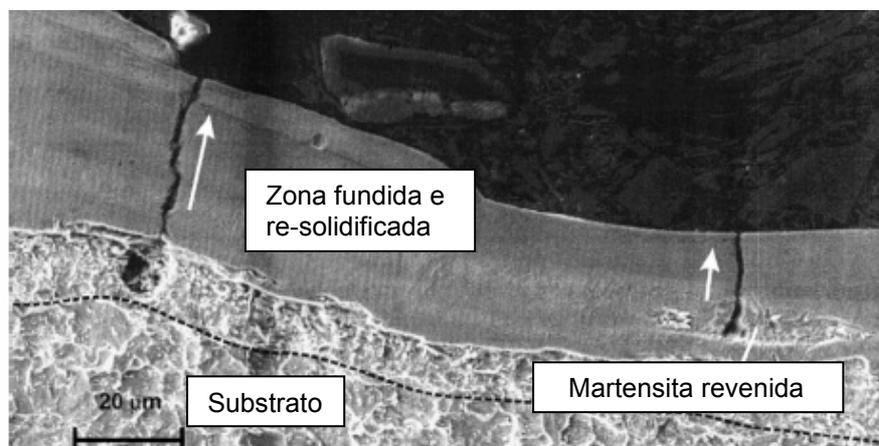


Figura 25: Zonas afetadas pelas descargas elétricas após a eletroerosão (CUSANELLI, 2004).

De acordo com Jameson (2001), a formação das partículas erodidas ocorre devido ao calor gerado pela colisão de elétrons na superfície do pólo positivo e íons na do pólo negativo, que são os eletrodos ferramenta e peça. Vapores combinados dos materiais de ambos, com o arrefecimento externo, promovido pelo fluido dielétrico, produzem uma partícula de forma esférica. Por esse motivo, a partícula erodida contém material de ambos, ferramenta e peça. A figura 26 ilustra a formação dessas partículas.

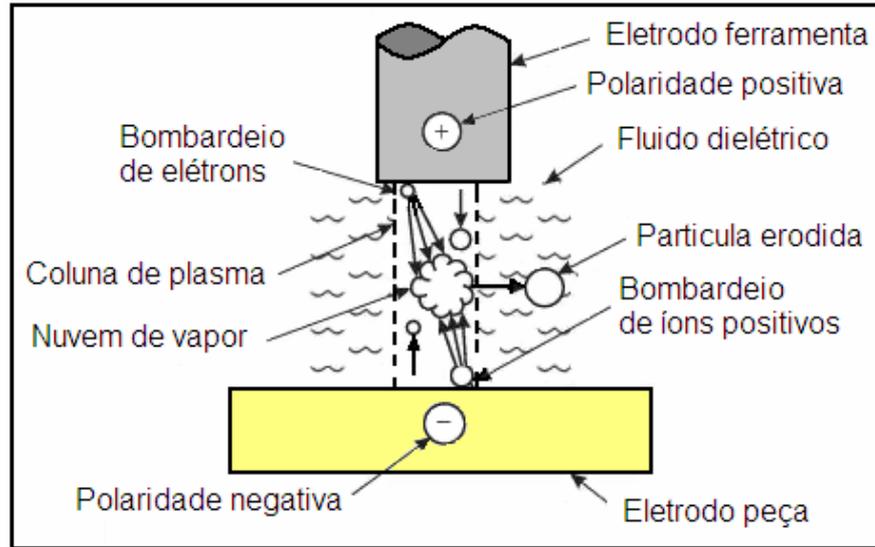


Figura 26: Formação da partícula erodida (JAMESON, 2003).

Segundo Amorim (2002), as partículas erodidas que são expelidas da fenda de trabalho, apresentam-se na maioria das vezes na forma de pequenas esferas sólidas ou ocas, a figura 27 mostra uma delas. Entretanto, partículas de geometria distintas dessas também podem ser observadas, sendo sua formação possivelmente acarretada pelo fenômeno de coalescência entre partículas. A geometria esférica sólida é devido à expulsão de material no estado líquido e as esferas ocas correspondem ao material expulso na forma de bolhas que rapidamente se solidificam ao entrar em contato com o fluido dielétrico.

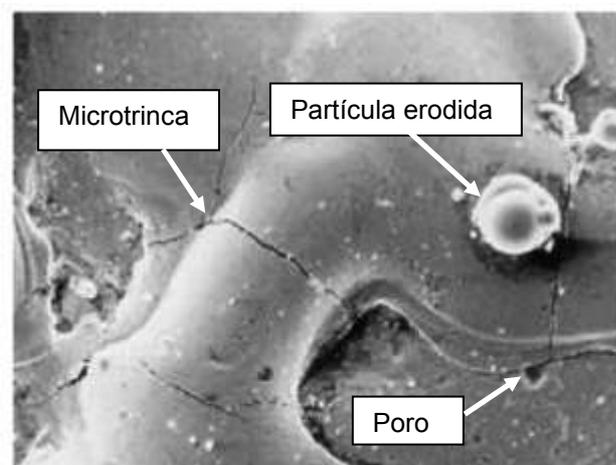


Figura 27: Micro trincas produzidas pelo processo de eletroerosão (GHANEM, 2003).

2.11 Óleo vegetal como fluido dielétrico

Segundo Araújo (2006), os óleos minerais são os mais utilizados como fluido isolante em equipamentos elétricos, porém investigações sobre o uso de óleos vegetais como fluido dielétrico mostraram-se favoráveis e os resultados das propriedades são próximos quando comparados com aos óleos minerais sintéticos. Devido ao seu desenvolvimento sustentável, segurança à saúde e ao meio ambiente, eles podem ser uma solução alternativa contra a futura escassez dos derivados de petróleo.

O material a ser aplicado como fluido dielétrico deve atender às exigências legais em relação ao meio ambiente e à saúde pública, dentre as quais:

- ▶ ser essencialmente não-tóxico;
- ▶ ser biodegradável;
- ▶ produzir subprodutos de baixo risco devido à degradação térmica;
- ▶ ser reciclável, re-condicionável e facilmente descartável;
- ▶ não ser classificado como material perigoso pelas agências ambientais e de saúde.

Na busca por mais eficiência, o estudo de materiais alternativos não-petrolíferos, de baixa periculosidade e com melhores características ambientais tornou-se uma evolução natural, tendo-se concluído que as características encontradas nesses novos isolantes superam até mesmo as dos óleos minerais altamente refinados. Uma classe de materiais com potencial para funcionar como refrigerante dielétrico, que parece atender a esses critérios ambientais e de saúde, é a do éster orgânico.

Os óleos vegetais são compostos por ésteres. Esses compõem uma classe ampla de compostos orgânicos, disponíveis como produtos agrícolas naturais ou sinterizados quimicamente por precursores orgânicos. O óleo vegetal pode ser baseado em ésteres sintéticos ou naturais.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta as adaptações feitas na máquina de eletroerosão por penetração, bem como a modificação no sistema de alimentação do fluido dielétrico, que possibilitaram os experimentos. São apresentados os ajustes dos parâmetros da máquina que propiciaram os regimes de trabalho desejados. São fornecidas as informações técnicas sobre os materiais dos eletrodos ferramenta e peça (amostras), bem como o formato de ambos.

O capítulo descreve também os procedimentos usados na determinação da taxa de remoção de material, na taxa de desgaste do eletrodo ferramenta e no desgaste volumétrico relativo, bem como a preparação e a análise das amostras metalográficas via microscopia ótica e eletrônica de varredura, e ainda a medida de rugosidade e microdureza.

3.1 Ajuste dos parâmetros da máquina

O trabalho de pesquisa foi realizado na máquina de eletroerosão por penetração modelo EDM 440 NC, com três eixos de trabalho, fabricada pela empresa AGIE CHARMILLES LTDA, ilustrada na figura 28.

Foram utilizados três tipos de fluidos dielétricos no experimento, um de origem mineral (querosene), outro mineral sintético e o terceiro de origem vegetal, também sintético, em amostras de aço AISI H13, com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico, nos regimes de trabalho de acabamento e desbaste, condições extremas do processo. O regime de acabamento retira pouco material da peça, promovendo um menor valor de rugosidade. Já o regime de desbaste retira uma quantidade maior de material da peça, produzindo valor de rugosidade alto. Foram

avaliadas taxa de remoção de material, taxa de desgaste do eletrodo ferramenta, desgaste relativo, integridade da superfície e rugosidade nas regiões usinadas.



Figura 28: Máquina EDM 440NC, instalada na PUC Minas.

Os regimes de trabalhos escolhidos foram obtidos de acordo com regulagem dos parâmetros estabelecidos pelo manual do fabricante da máquina EDM 440NC, para a condição de eletroerosão de peça de aço com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico. A tabela 1 apresenta um quadro comparativo dos parâmetros para tal condição. Considerando-se dois regimes para trabalhar com os três fluidos dielétricos (sintético, querosene e vegetal), durante quatro tempos de trabalhos diferentes (5, 10, 15 e 20 minutos), repetidos sete vezes. No total, foram usinadas 168 amostras.

De acordo com Lee (2005), para desenvolvimento de testes de investigações, dentro da faixa de confiabilidade de 75 a 88%, o número replicações de amostras é 6 a 12. Por isso, foi arbitrado o número de sete ensaios, que corresponde a uma confiabilidade de 85%.

TABELA 1
Parâmetros da máquina utilizados nos regimes de trabalho.

Parâmetro	Unidade	Regime de trabalho	
		Acabamento	Desbaste
Polaridade do eletrodo ferramenta (cobre eletrolítico/aço)		+	+
Tensão	V	100	100
Corrente	A	6	30
T _{on}	µs	100	500
TS		2	10
DT	%	87	97

Fonte: Catálogo da máquina EDM 440 NC (ENGEMAQ, 2002).

O regime de trabalho de acabamento foi o primeiro aplicado para todos os fluidos dielétricos. Os regimes de trabalho, como mencionado, visavam a atingir os limites extremos: no regime de acabamento, pouca retirada de material do eletrodo peça e, teoricamente, pouco desgaste do eletrodo ferramenta, conseqüentemente, bom acabamento superficial com baixo valor de rugosidade. Condição contrária ao regime de desbaste, muita retirada de material da peça, com alto desgaste da ferramenta, e alto valor de rugosidade.

A polaridade indica a posição dos eletrodos, se anodo ou catodo em relação às descargas elétricas, propiciando uma maior retirada de material de uma das superfícies, geralmente, do eletrodo peça, já que o eletrodo ferramenta deve sofrer o menor desgaste possível. A polaridade pode ser invertida na máquina.

A tensão para ionização e para formação do canal de plasma foi mantida constante de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo manual do fabricante da máquina. A figura 29 ilustra o painel da máquina que mostra os valores desses parâmetros e o *display* para alteração dos mesmos. A corrente de descarga,

consumida no processo, tem influência direta na qualidade e no rendimento da operação, com isso, uma qualidade melhor implica corrente baixa e pouca quantidade de material removido com um tempo maior de usinagem. No caso da máquina utilizada no experimento, esse valor da corrente depende do parâmetro TS, regulado na máquina, ela vale 3 vezes TS. Logo, para o regime de acabamento, trabalhando com $TS = 2$, gerou-se uma corrente de 6 A. Já no regime de desbaste $TS = 10$, a corrente foi de 30 A. T_{on} , o tempo total de duração do pulso, no regime de acabamento, foi usado $T_{on} = 100$ e no regime de desbaste $T_{on} = 500$ micro segundos. DT está relacionado com o tempo de pausa. No caso da máquina usada no experimento, o mesmo é dado em porcentagem relacionada com o tempo T_{on} . A equação (3) determina seu valor.

$$DT = \frac{t_{on}}{(t_{on} + t_{off})} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

onde:

T_{on} = tempo de pulso [μs]

T_{off} = tempo de intervalo [μs].



Figura 29: Painel indicativo dos parâmetros da máquina e *display*.

O diagrama ilustrado, na figura 30, mostra a seqüência dos trabalhos experimentais e a avaliação dos mesmos.

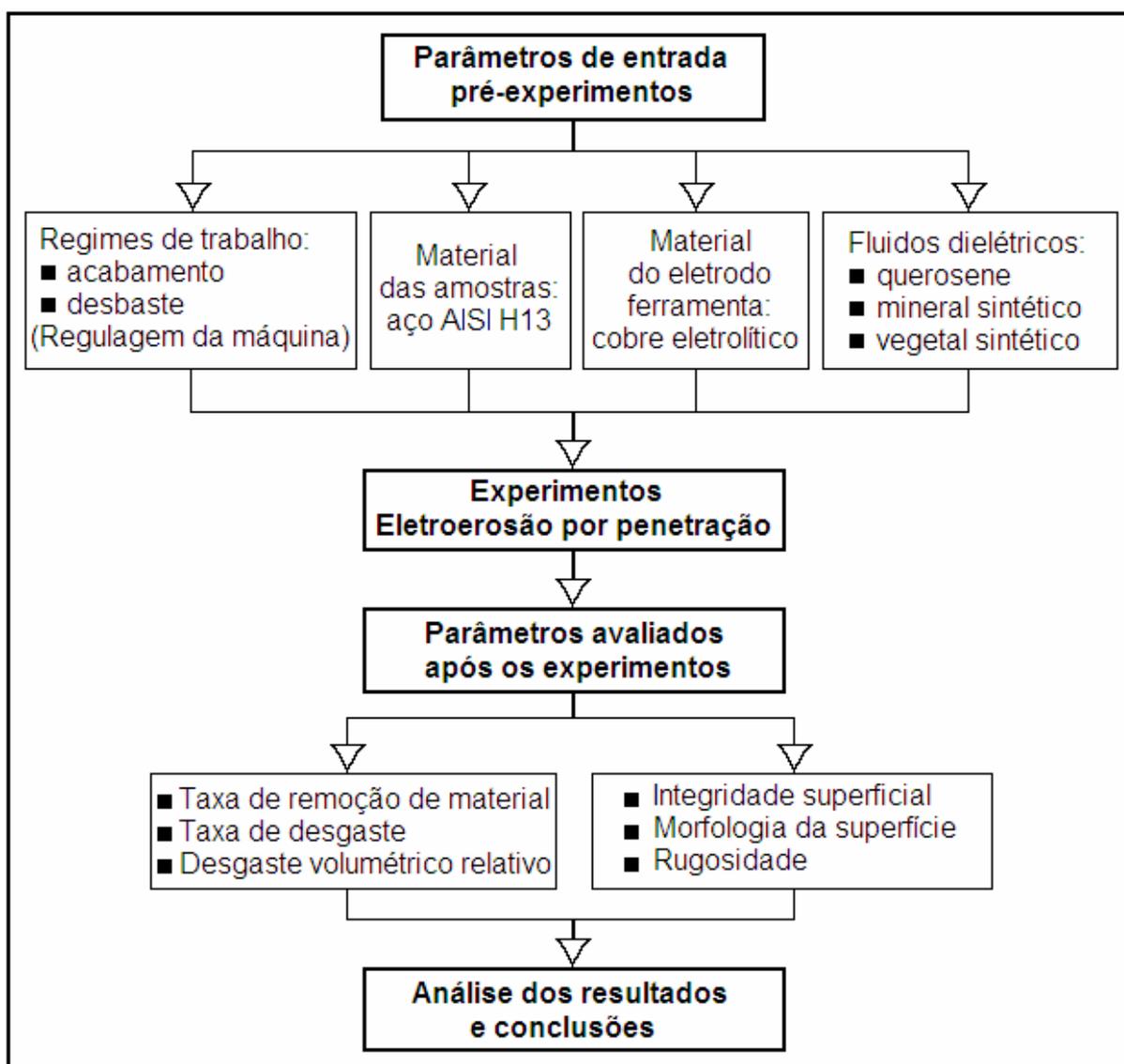


Figura 30: Diagrama de trabalho.

O querosene foi adquirido no mercado em baldes de 18 litros do fabricante ESSO. Em comparação com os fluidos apropriados para os trabalhos em electroerosão por penetração, o querosene ainda é muito usado nas fábricas dos países do terceiro mundo. Ele tem, como principal vantagem, o preço baixo, com as desvantagens de ser tóxico e nocivo para o meio ambiente, além do risco de fogo.

O fluido mineral sintético, fabricado pela empresa ARCHEM, especificação Arclean Elétron, é recomendado pelo fabricante da máquina de EDM e foi adquirido em tambores de 200 litros cada. Tem características bem parecidas com o querosene sem as desvantagens do mesmo, que são controladas pelos aditivos.

O fluido dielétrico vegetal sintético, fornecido pela empresa Cooper Power, no total de 38 litros, especificado como Envirotemp FR3, é apropriado para trabalhar como dielétrico em transformadores, biodegradável, não nocivo ao meio ambiente, sem risco de fogo e renovável, porém, se comparado a outros, tem valores de viscosidade e densidade altos, além de preço elevado, conforme mostra a tabela 2. Além das medidas de viscosidade fornecidas pelos fabricantes, a mesma foi calculada com auxílio do Viscosímetro de Hüppler, ilustrado na figura 31, e por meio de fórmulas e tabelas fornecidas pelo catálogo do fabricante. O ensaio foi realizado no laboratório de metrologia da PUC Minas, a uma temperatura de aproximadamente 20°C. Os resultados obtidos foram: 3,1 cSt, para o querosene, 2,9 cSt, para o mineral sintético e 41 cSt, para o vegetal sintético, valores esses que condizem com os especificados pelos fabricantes, mostrados na tabela 2.

TABELA 2
Quadro comparativo entre os fluidos dielétricos, utilizados nos experimentos.

	Unidade	Querosene	Mineral sintético	Vegetal sintético
Preço de aquisição	U\$ / litro	1,50	2,50	4,00
Viscosidade	cSt	3,1	2,9	41
Densidade*	g/ml	0,76 a 0,822	0,78 a 0,81	0,92

*Anexos A, B e C.



Figura 31: Viscosímetro de Hüppler.

3.2 Modificação no sistema de alimentação do fluido dielétrico

Foi necessária uma adaptação no sistema de alimentação do fluido dielétrico da máquina que propiciasse uma troca ágil e eficiente do fluido dielétrico, sem retirar todo o líquido armazenado no tanque da máquina, que tem capacidade para 420 litros. Foram utilizados apenas 30 litros de cada, aproximadamente, dos fluidos durante a realização do experimento. A quantidade reduzida também se fez necessária devido à limitação na quantidade de fluido dielétrico vegetal disponível, já que foram conseguidos somente 38 litros do mesmo, doados pelo distribuidor.

O fluido dielétrico não foi captado diretamente do tanque da máquina e, sim, de um tanque auxiliar (com capacidade para aproximadamente 33 litros), posicionado na frente da máquina, por intermédio de uma bomba de 1/8 CV e 3800 RPM, como mostra a figura 32.

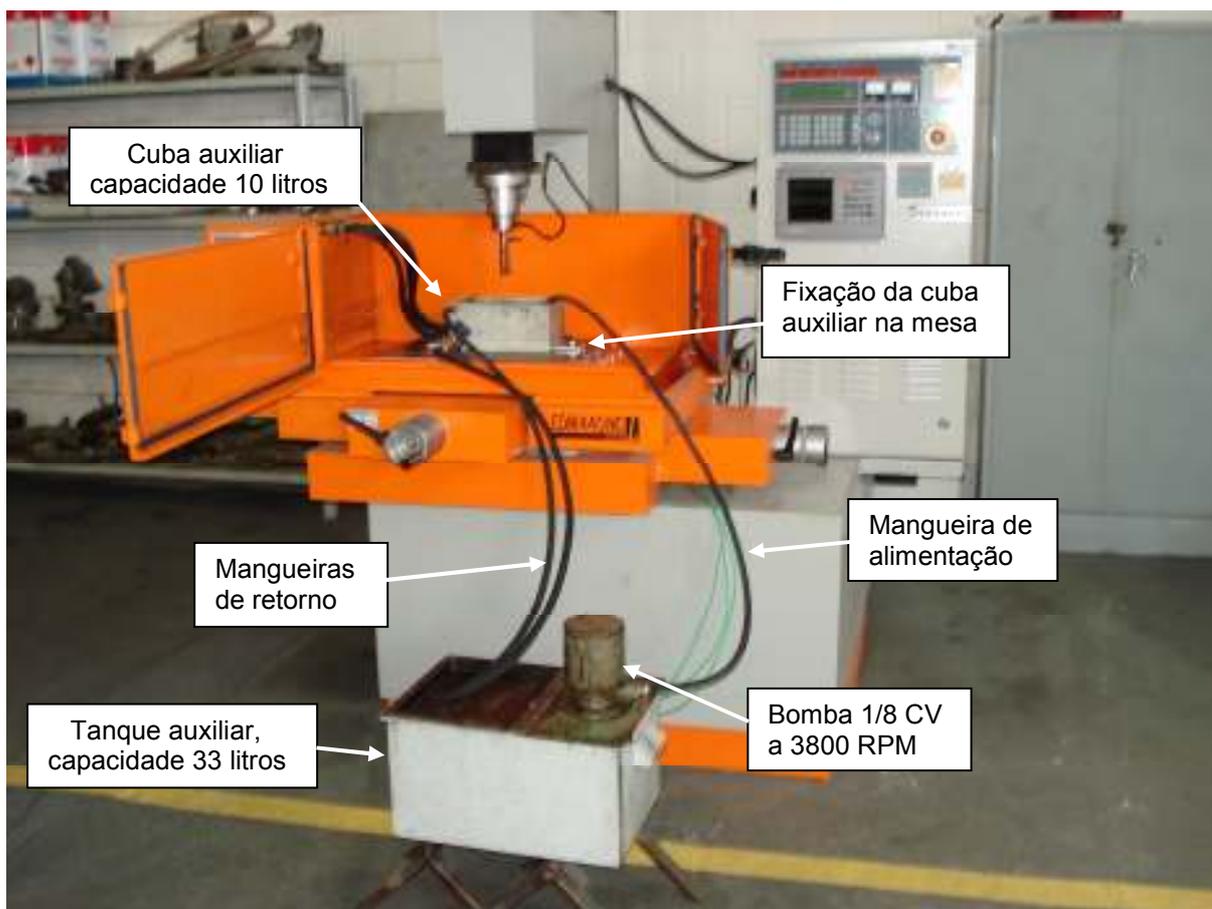


Figura 32: Adaptação do tanque auxiliar ao sistema de alimentação da máquina.

A utilização de uma quantidade reduzida do fluido dielétrico inviabilizou a utilização da cuba de trabalho da máquina, usada no processo, já que a mesma tem capacidade para 70 litros. Logo, para atingir o nível de trabalho do sistema, era necessária uma quantidade de fluido da qual o novo sistema de alimentação, adaptado para a realização do experimento, não tinha. Com isso, uma cuba auxiliar, de tamanho reduzido, com capacidade para 10 litros, foi adaptada e fixada à mesa no interior da cuba existente, como mostra a figura 33. Um registro de gaveta foi instalado na saída da cuba auxiliar, como mostra a figura 33, o que permitiu controlar o fluxo de retorno do fluido dielétrico, mantendo o nível do mesmo dentro da cuba auxiliar.



Figura 33: Cuba auxiliar, de tamanho reduzido, adaptada ao sistema.

Para trabalhar com a cuba da máquina aberta, simulando as condições de trabalho, que ocorrem com a cuba fechada, a moto bomba da máquina, que alimenta a cuba da máquina com o fluido dielétrico, foi desligada e sua fiação elétrica foi conectada à bomba do sistema de alimentação auxiliar adaptado, conforme ilustrado na figura 34. O sistema de nível de trabalho do fluido dielétrico foi travado como mostra a figura 35, para simular as condições de trabalho com a cuba fechada.

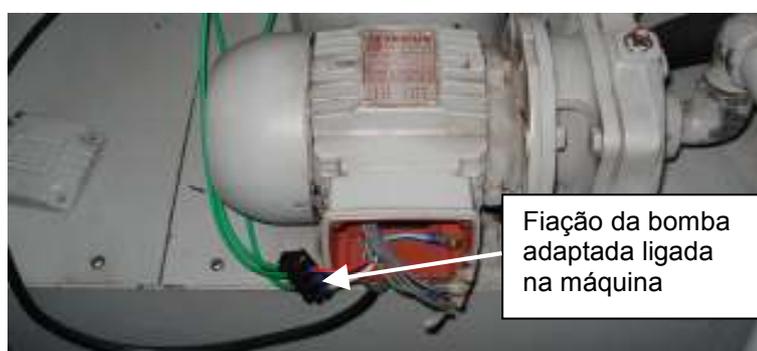


Figura 34: Ligação da bomba auxiliar na máquina EDM.

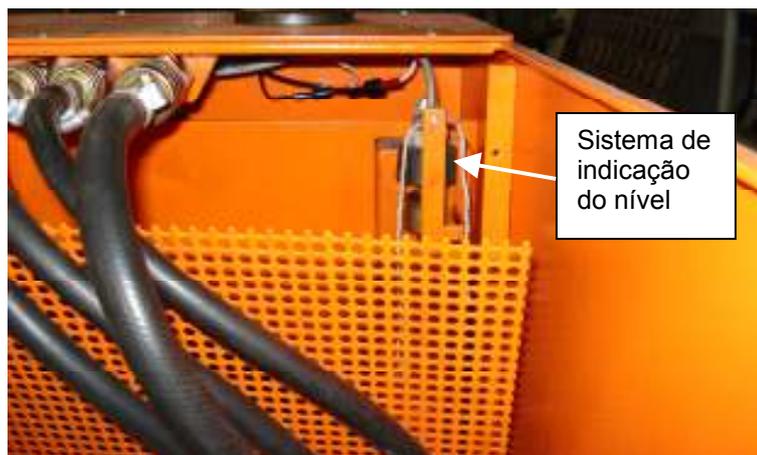


Figura 35: Sistema de indicação do nível de fluido dielétrico da máquina de EDM, travado.

Um dispositivo, para fixação das amostras, projetado para o posicionamento das mesmas durante a execução da eletroerosão, foi instalado dentro da cuba auxiliar, conforme mostra a figura 36, de maneira que, durante o regime de trabalho de desbaste, o furo para redução do tempo de usinagem permanecesse centrado com o eletrodo ferramenta em todas as operações.



Figura 36: Dispositivo para fixação das amostras durante a usinagem, instalado na cuba auxiliar.

Foi utilizado no experimento o sistema de limpeza por jato lateral. A própria agitação do fluido dielétrico, dentro da cuba auxiliar, ajudou nesse sistema. A figura 37 ilustra esta agitação.



Figura 37: Agitação do fluido dielétrico no interior da cuba auxiliar.

Como pouca quantidade de material foi retirada no regime de acabamento, o sistema funcionou muito bem.

No regime de desbaste, a limpeza foi propiciada pela combinação de jato lateral, com limpeza sobre pressão, conforme ilustra a figura 38, já que o pré-furo da amostra facilitou a remoção das partículas erodidas da fenda de trabalho. As partículas saíam por furos abertos na lateral no corpo do dispositivo. A cada troca de fluido, o dispositivo era retirado e limpo, bem como a cuba e o reservatório. Foi observado um acúmulo das partículas erodidas no interior do furo central do dispositivo.

O primeiro fluido utilizado foi o querosene, depois o mineral sintético e por último o vegetal sintético. Sempre começando pelo regime de trabalho de acabamento e com o tempo inicial de 5 minutos, passando, em seguida, para os outros tempos: 10, 15 e, por último, 20 minutos, sete vezes cada tempo. Em seguida, as amostras foram usinadas no regime de desbaste obedecendo à mesma metodologia do regime de acabamento, com relação aos tempos.

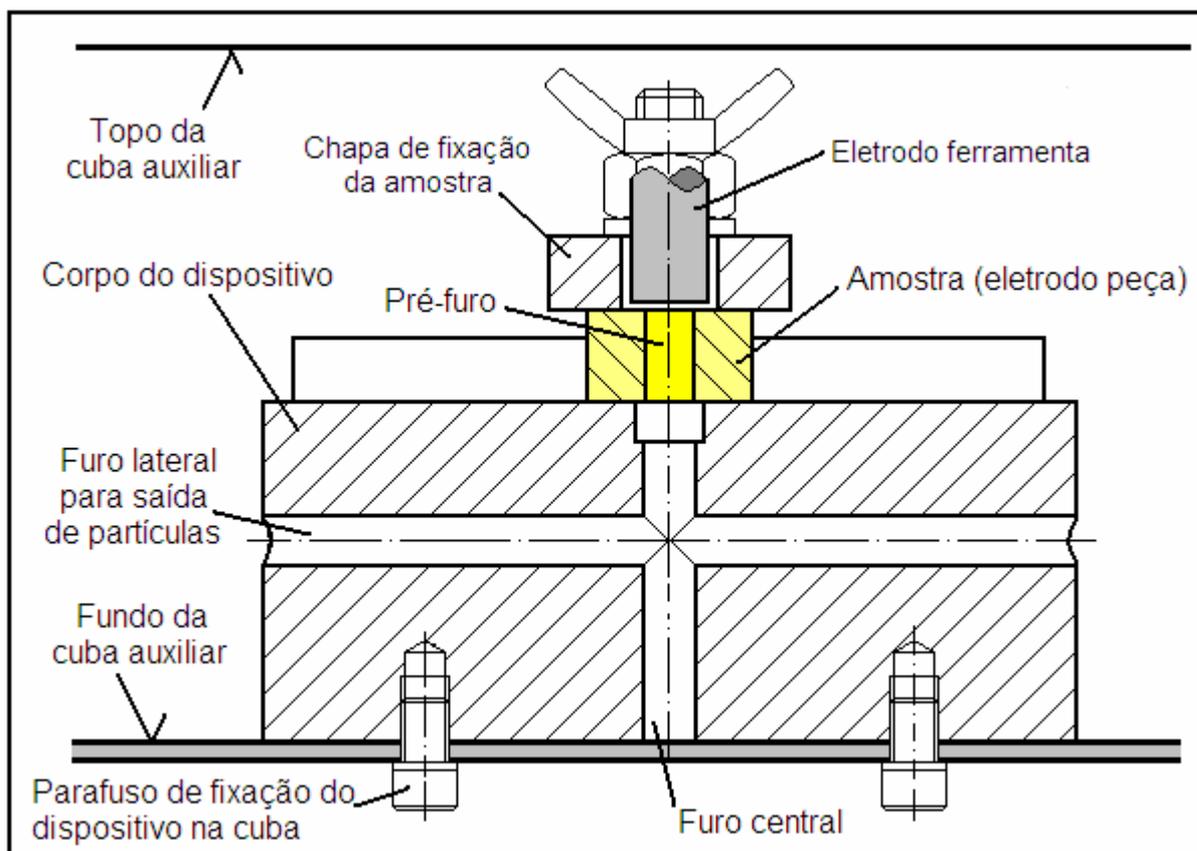


Figura 38: Limpeza no regime de desbaste, auxiliada pelo pré-furo (Arquivo pessoal)

Nenhum sistema de filtragem foi utilizado durante os experimentos. Foram feitas três tentativas durante os pré-testes, todas em vão. A primeira, por meio do próprio sistema da máquina, a quantidade do fluido inviabilizou o funcionamento, já que o reservatório dos filtros demanda uma quantidade de fluido acima da utilizada nos experimentos. Na segunda, usando-se o sistema de filtragem de partículas magnéticas, uma quantidade pequena de partículas ficava retida pela ação do imã. E por último, na terceira, utilizando-se um filtro, adaptado à saída da bomba. A restrição promovida pela passagem do fluido, através do filtro, aquecia o fluido dielétrico.

Funcionar sem filtro não foi um inconveniente, algumas máquinas de eletroerosão antigas trabalhavam com sistemas de filtragem simples, utilizando filtros de papel micro-poroso, como pode ser visto na figura 39 que ilustra uma destas máquinas.



Figura 39: Máquina de eletroerosão da década de 60, que trabalha sobre uma mesa, no detalhe, o sistema de filtragem, que fica posicionado sob a mesa.

O funcionamento sem filtro com fluido mineral sintético e querosene foi satisfatório, porém, com o vegetal sintético, a viscosidade elevada dificultou o retorno do mesmo para o tanque auxiliar. Esse problema foi sanado com a abertura total do registro de gaveta.

3.3 Material e formato das amostras

As amostras foram confeccionadas, em aço AISI H13, no formato retangular de 10x20x25 milímetros, para o regime de acabamento, e 15x20x25mm, aproximadamente, com um furo passante de 6 mm, ao longo da espessura de 15 mm, para o regime de desbaste severo, como mostra a figura 40, ambas fresadas.



Figura 40: Amostra para regime de desbaste.

A execução do furo, nas amostras para desbaste, tinha como finalidade reduzir o tempo de eletroerosão, já que nos pré-testes foram necessários 45 minutos para produzir um furo com 10 mm de profundidade, quando utilizado o fluido dielétrico mineral sintético. Essa profundidade era necessária para que a rugosidade na periferia interna deste furo pudesse ser medida com o rugosímetro de agulha, como ilustra a figura 41. Esse tempo elevado provocou um inconveniente durante os pré-testes. A quantidade reduzida do fluido dielétrico mineral, que circulou no sistema adaptado, atingiu uma temperatura de aproximadamente 40°C. O fabricante do fluido não aconselha a realização do processo de eletroerosão com o mesmo acima dessa temperatura.

O aço AISI H13 é destinado à fabricação de matrizes para forjamento a quente, em prensas, moldes para a injeção de plásticos, matrizes para fundição de ligas de alumínio, estanho ou zinco, ferramentas para extrusão, entre outros. Além de um aço altamente ligado (a tabela 3 ilustra a composição química do mesmo), ao cromo-molibdênico-vanádio, é temperável em óleo e ar, de excelente tenacidade, alta resistência mecânica e boa resistência às temperaturas elevadas, o aço apresenta, ainda, boa resistência à fadiga térmica, ótima resistência ao choque térmico e ao amolecimento pelo calor.



Figura 41: Rugosímetro Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+, medindo a rugosidade na periferia do furo usinado no regime de desbaste.

TABELA 3
Composição química em percentual do aço H13 de acordo com norma AISI.

Carbono	Manganês	Fósforo máx.	Enxofre máx.	Silício	Cromo	Molibdênio	Vanádio
0,32–0,45	0,20–0,50	0,030	0,030	0,80–1,20	4,75–5,50	1,10–1,75	0,80 a 1,20

Fonte: FAVORIT AÇOS ESPECIAIS, 2007.

Antes dos experimentos, as peças foram tratadas termicamente, aquecidas em forno elétrico de resistência, como mostra a figura 42. Primeiramente, as peças foram submetidas ao tratamento de alívio de tensões, a uma temperatura de aproximadamente 650°C, durante um tempo de encharque de 20 minutos. Em seguida, foram temperadas em óleo a 1.040°C, com tempo de encharque de 20 minutos, com dois tempos de pré-aquecimento de 600°C, o primeiro, e de 860°C, o segundo, ambos com tempo de encharque de 5 minutos. Por último, as peças foram submetidas a dois ciclos de revenimento, ambos a 500°C com tempo de encharque de 20 minutos. A figura 43 ilustra o diagrama temperatura x tempo para o ciclo de tratamento térmico do aço AISI H13.



Figura 42: Amostras em tratamento térmico no interior do forno elétrico.

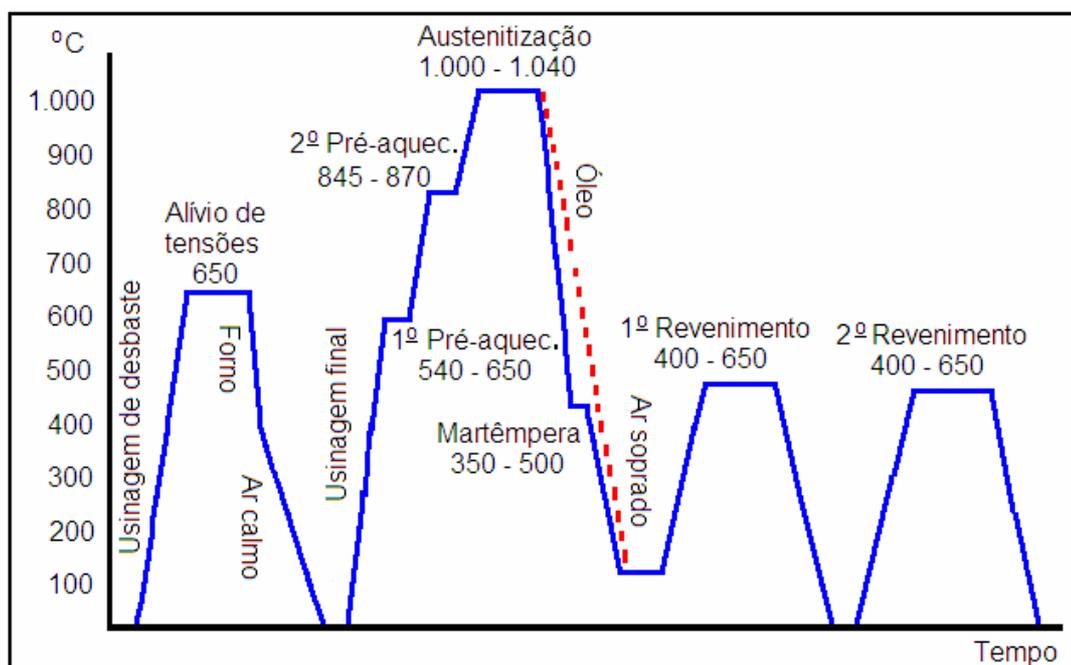


Figura 43: Diagrama do ciclo para tratamento térmico do aço AISI H13. (FAVORIT AÇOS ESPECIAIS, 2007).

3.4 Material e formato do eletrodo ferramenta

Os eletrodos ferramenta foram confeccionados no formato cilíndrico com diâmetro de 10,9 mm e comprimento de 50 mm, conforme ilustrado na figura 44, em cobre eletrolítico, material que possui boa condutividade térmica e elétrica, características importantes para o bom desempenho do eletrodo ferramenta, usado no processo de eletroerosão por penetração.



Figura 44: Eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico.

De acordo com Arantes (2001), cobre é o material convencionalmente empregado em usinagem de eletroerosão, devido à alta condutividade térmica e ao fato de proporcionar um baixo valor de desgaste relativo. A tabela 4 apresenta um quadro com as principais propriedades desse material.

TABELA 4
Propriedades físicas e elétricas do cobre eletrolítico.

Propriedade	Unidade	Valor
Peso específico	g/cm ³	8,9
Ponto de fusão	°C	1083
Resistividade elétrica	Ωmm	0,0167
Condutividade térmica relativa	%	94,3
Condutividade elétrica relativa	%	96,3

Fonte: Arantes, 2001.

Uma pinça porta ferramenta, de cobre, foi adaptada ao porta eletrodo para facilitar a troca dos eletrodos ferramenta, figura 45. A cada troca, a crosta de material carbonetado, que aderira à ponta dos mesmos, bem como as crateras, promovidas pelas descargas elétricas, eram retiradas por meio de operação de usinagem, realizada em um torno mecânico, para que todas as operações de eletroerosão fossem iniciadas com ferramentas de superfície limpa e regular.



Figura 45: Montagem do eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico na pinça porta ferramenta.

3.5 Determinação da variação de massa de peça (amostra) e ferramenta

Durante a execução dos experimentos, as amostras foram pesadas (cinco vezes), antes e após cada série de eletroerosão, em todos os regimes e tempos. Utilizou-se uma balança eletrônica FA 2104N, de marca Bioprecisa, com capacidade máxima para 210,4 gramas e resolução de 10^{-4} g, ilustrada na figura 46.

A média dos cinco valores foi usada no cálculo da variação de massa, determinada pela diferença entre as massas inicial (m_i) e final (m_f), obtida da equação (4).

$$\Delta_m = m_i - m_f \quad [\text{gramas}] \quad (4)$$

onde:

m_i = massa inicial [g];

m_f = massa final [g].



Figura 46: Balança eletrônica usada nos experimentos.

3.6 Análise da taxa de remoção de material da peça (amostra)

Para quantificar a taxa de remoção de material (V_w), foi utilizada a equação (5).

$$V_w = \frac{\Delta_m}{(0,00785) \cdot t} \quad [\text{mm}^3 / \text{min}] \quad (5)$$

onde:

Δ_m = variação de massa [g];

t = tempo de usinagem [min];

e a constante $0,00785 \text{ g/mm}^3$ correspondente ao peso específico do aço (VDI 3402, 2007).

3.7 Determinação da taxa de desgaste do eletrodo ferramenta

A equação (6) foi usada para determinar a taxa de desgaste do eletrodo ferramenta

$$V_e = \frac{\Delta_m}{(0,00889) \cdot t} \quad [\text{mm}^3 / \text{min}] \quad (6)$$

onde:

Δ_m = variação de massa [g];

t = tempo de usinagem [min];

e a constante 0,00889 g/mm³ correspondente ao peso específico do cobre eletrolítico (VDI 3402, 2007).

Para determinação do desgaste volumétrico relativo, foi aplicada a equação (1).

3.8 Rugosidade

Foram medidas as rugosidades médias R_a , que segundo Novaski (1994) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição e R_z , a média aritmética dos 5 valores da rugosidade parcial Z_i . A rugosidade parcial Z_i é definida como a soma dos valores absolutos das ordens dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes dentro de um comprimento de amostragem (Novaski, 1994).

A rugosidade da cavidade usinada das amostras foi medida com o rugosímetro Surtronic 3+ da marca Taylor Hobson. A figura 47 mostra a medição para o regime de acabamento. A área avaliada foi o fundo da cavidade. No regime de desbaste, a região avaliada foi a periferia do furo, produzido pela eletroerosão, como ilustra a figura 48.



Figura 47: Medição de rugosidade no fundo da cavidade da amostra usinada no regime de acabamento.



Figura 48: Medição de rugosidade na periferia do furo da amostra usinada no regime de desbaste.

3.9 Preparação das amostras e análise de microscopia ótica

Amostras usinadas pelos três fluidos nos dois regimes de trabalho foram cortadas, bipartidas de modo que cada parte continha metade da cavidade usinada. Cada metade foi preparada para ataque com Nital a 2%, o que possibilitou a observação da zona branca. Elas foram embutidas e, posteriormente, lixadas e polidas na máquina politriz, ilustrada na figura 49.



Figura 49: Máquina politriz DP-U2.

A análise de microscopia ótica foi realizada no banco metalográfico Neophot 21, mostrado na figura 50.



Figura 50: Banco metalográfico Neophot 21.

3.10 Análise via microscópio eletrônico de varredura

Para avaliar a integridade e a morfologia das superfícies usinadas das amostras, no regime de desbaste com os três fluidos dielétricos, as mesmas foram cortadas e limpas para possibilitar a observação das superfícies usinadas no microscópio eletrônico de varredura JSM-5310 da empresa JEOL, pertencente ao Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), ilustrado na figura 51. Para o regime de acabamento, limpou-se apenas a superfície usinada que já estava à mostra, não necessitando de corte.



Figura 51: Microscópio Eletrônico de Varredura.

3.11 Análise de micro-dureza

Foram realizados ensaios de micro-dureza Vickers na região da zona termicamente afetada pelo calor, próxima da zona branca, e no substrato em amostras usinadas pelos três fluidos no regime de desbaste. A pouca espessura da zona branca, promovida pelo regime de acabamento, inviabilizou a medição da micro-dureza nas amostras usinadas nesse regime.

Utilizou-se uma carga de 50 gramas durante o tempo de 15 segundos. A figura 52 ilustra o durômetro usado. As medições foram realizadas na Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), no Setor de Tecnologia Metalúrgica (SDT).



Figura 52: Durômetro usado no ensaio de micro-dureza.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma análise dos resultados dos experimentos realizados, comparando o desempenho dos três fluidos dielétricos na usinagem das amostras durante os dois regimes de trabalho.

4.1 Variação de massa dos eletrodos peça e ferramenta

Aplicando-se as medidas de peso inicial, antes da eletroerosão, e final, após a usinagem na equação (4), obtiveram-se valores que foram usados nas construções dos gráficos das figuras 53 a 56. Esses gráficos representam a perda de massa das amostras (eletrodos peças) nos regime de desbaste (figura 53) e acabamento (figura 55), e a perda de massa das ferramentas nos regimes de desbaste (figura 54) e acabamento (figura 56), durante o tempo de usinagem de 20 minutos. Considerando-se a série de regime de desbaste, a figura 53 ilustra um gráfico comparativo entre as sete repetições. Nota-se que o fluido dielétrico vegetal foi o que promoveu maior taxa de remoção de material, 97% em relação ao querosene, seguido do mineral sintético que obteve taxa de 16% a mais, comparada ao querosene. Nota-se, na Tabela 5, que, durante os experimentos para a série de sete vezes, os fluidos mineral sintético e querosene comportaram-se bem semelhantes em relação à dispersão dos resultados, já que as variâncias dos mesmos têm valores próximos. Já o fluido vegetal teve maior variabilidade nos resultados em comparação aos outros dois fluidos, o que pode ser observado por meio do desvio padrão, com valor 50% maior em relação ao querosene e ao mineral sintético.

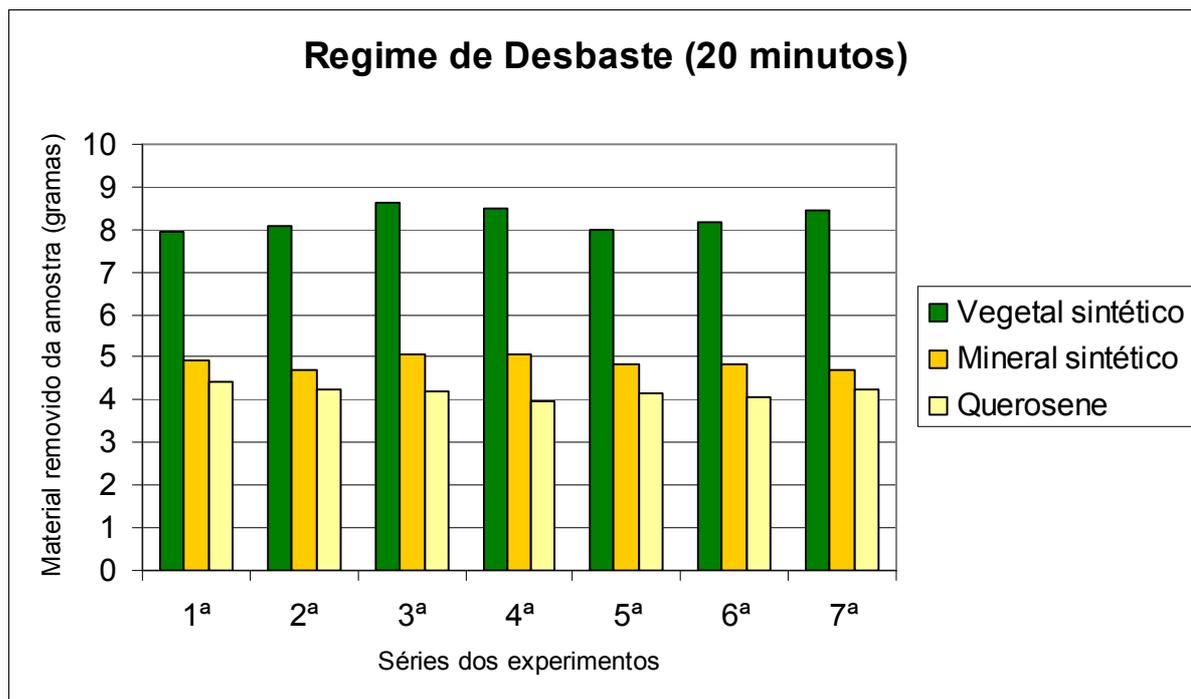


Figura 53: Gráfico dos valores da perda de massas das sete amostras no regime de desbaste.

TABELA 5

Variabilidade dos valores da perda de massa das sete amostras no regime de desbaste durante 20 minutos.

Fluido	Maior valor	Menor valor	Amplitude	Média	Variância*	Desvio Padrão
Vegetal sintético	8,6455	7,9627	0,6828	8,2603	0,0701	0,2648
Mineral sintético	5,0802	4,6868	0,3934	4,8807	0,0254	0,1593
Querosene	4,4372	3,9706	0,4666	4,1977	0,0227	0,1507

*Medidas em gramas, exceto variância em g².

Provavelmente, a alta taxa de remoção de material, atribuída ao fluido vegetal sintético, deve-se ao tamanho do *gap* (fenda de trabalho) que a máquina estabeleceu para o funcionamento de acordo com os parâmetros escolhidos pelo operador. Essa seleção da fenda de trabalho é automática, não interferindo no funcionamento da máquina, de acordo com o manual de operação (ENGEMAQ, 2002). Fendas de trabalho, com maior distância entre os eletrodos, provocam maior remoção de material. A determinação dessa fenda de tamanho maior, em comparação à estabelecida durante a usinagem com os outros dois fluidos, pode ser influenciada pelo maior valor da viscosidade do vegetal sintético. Lembrando-se de que a máquina de eletroerosão, EDM 440 NC, foi projetada para trabalhar com fluido mineral sintético Arclean Eletron, que possui características físicas bem

parecidas com o querosene. A variabilidade dos resultados pode ser influenciada pela dificuldade de limpeza da fenda de trabalho, função do fluido dielétrico, que comportasse melhor quando possui baixa viscosidade.

Em relação ao desgaste do eletrodo ferramenta, o fluido vegetal foi o que provocou maior desgaste, 5 vezes maior que do querosene, como mostra a figura 54, seguido de um desempenho semelhante entre os fluidos mineral sintético e querosene. O querosene foi o que teve menor variabilidade dos resultados como pode ser visto na tabela 6.

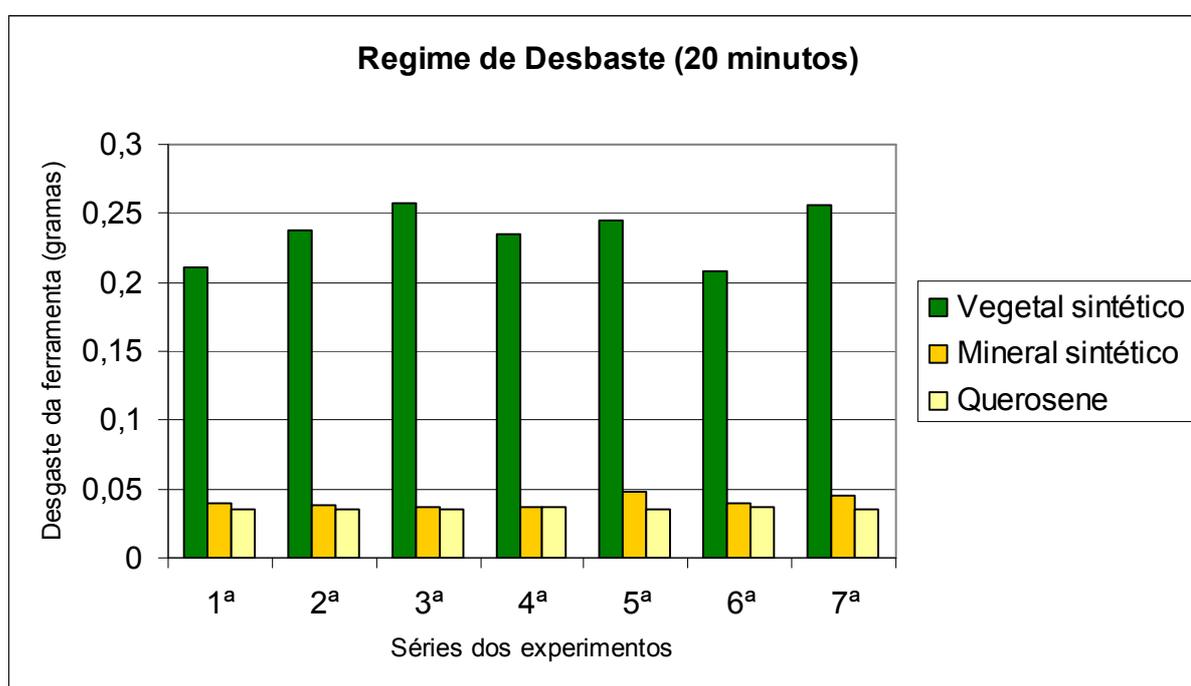


Figura 54: Gráfico dos valores da perda de massas dos sete eletrodos ferramentas no regime de desbaste.

TABELA 6

Variabilidade dos valores da perda de massa dos sete eletrodos ferramenta no regime de desbaste durante 20 minutos.

Fluido	Maior valor	Menor valor	Amplitude	Média	Variância*	Desvio Padrão
Vegetal sintético	0,2576	0,2087	0,0489	0,2360	0,0003893	0,0197
Mineral sintético	0,0482	0,0361	0,0121	0,0405	0,0000194	0,0044
Querosene	0,0363	0,0350	0,0013	0,0357	0,0000002	0,0004

*Medidas em gramas, exceto variância em g².

A densidade do fluido interfere no tamanho do canal de plasma, que tem relação com a mobilidade dos elétrons e dos íons positivos. Lembrando-se, ainda, de que o valor de densidade alta do fluido vegetal aumenta a quantidade de elétrons livres, gerados pelo choque de elétrons contra os átomos, causando assim um poder de destruição acentuado no anodo.

Levando-se em conta as repetições do regime de acabamento, durante o tempo de 20 minutos, o fluido mineral sintético foi o que promoveu a maior remoção de material das amostras em gramas, 50% maior que o vegetal sintético, como pode ser observado na figura 55, seguido do querosene, 10% a mais do que o vegetal sintético. Observa-se, também, que, apesar da condição de inferioridade do desempenho do vegetal sintético, o seu comportamento em relação à variabilidade ficou próximo do mineral sintético, levando-se em conta os valores da tabela 7. Os valores de amplitude e de variância estão bem próximos para ambos os fluidos. O querosene, aqui, comportou-se melhor do que os outros, com menor variabilidade nos resultados.

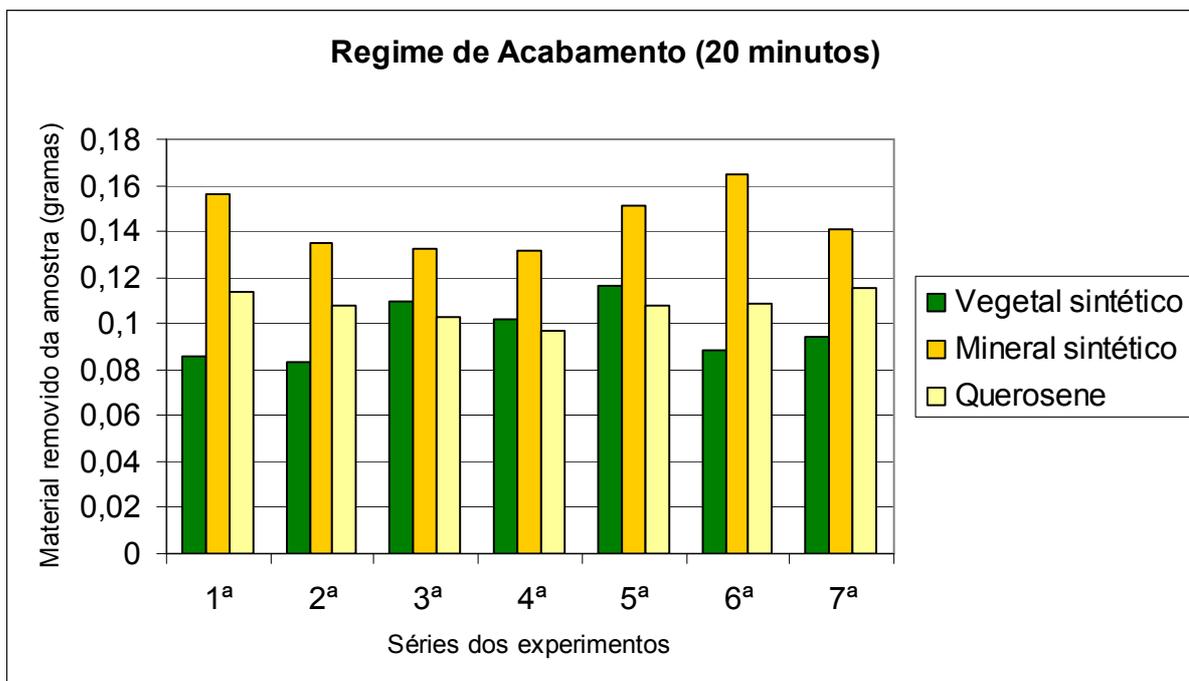


Figura 55: Gráfico dos valores da perda de massas das sete amostras no regime de acabamento.

TABELA 7

Variabilidade dos valores da perda de massa das sete amostras no regime de acabamento durante 20 minutos.

Fluido	Maior valor	Menor valor	Amplitude	Média	Variância*	Desvio Padrão
Vegetal sintético	0,1163	0,0833	0,0330	0,0970	0,00016084	0,01268
Mineral sintético	0,1647	0,1320	0,0327	0,1447	0,00016377	0,01280
Querosene	0,1152	0,0971	0,0181	0,1077	0,00003839	0,00620

*Medidas em gramas, exceto variância em g².

Para essa condição de trabalho, o comportamento do fluido vegetal sintético foi semelhante ao do mineral sintético, em termos de variabilidade. Nota-se que os valores de amplitude e de variância são bem próximos. Já em relação à quantidade de material removido do eletrodo peça (amostra), o valor obtido pelo vegetal sintético é pouco menor do que o do querosene. Os três fluidos comportaram-se de modo bem parecido em relação à taxa de remoção de material da peça, principalmente o mineral sintético e o vegetal sintético.

Considerando-se o desgaste da ferramenta, no regime de acabamento, durante o tempo de 20 minutos, o fluido vegetal provocou maior perda de massas, 60%, quando comparado aos outros dois fluidos, de acordo com a figura 56. O fluido mineral sintético teve desempenho melhor do que o querosene, desgastando menos o eletrodo ferramenta. Levando-se em consideração a variabilidade dos resultados, o mineral sintético comportou-se semelhante com o querosene, já que os dois fluidos produziram valores de variância próximos, como mostra a tabela 8.

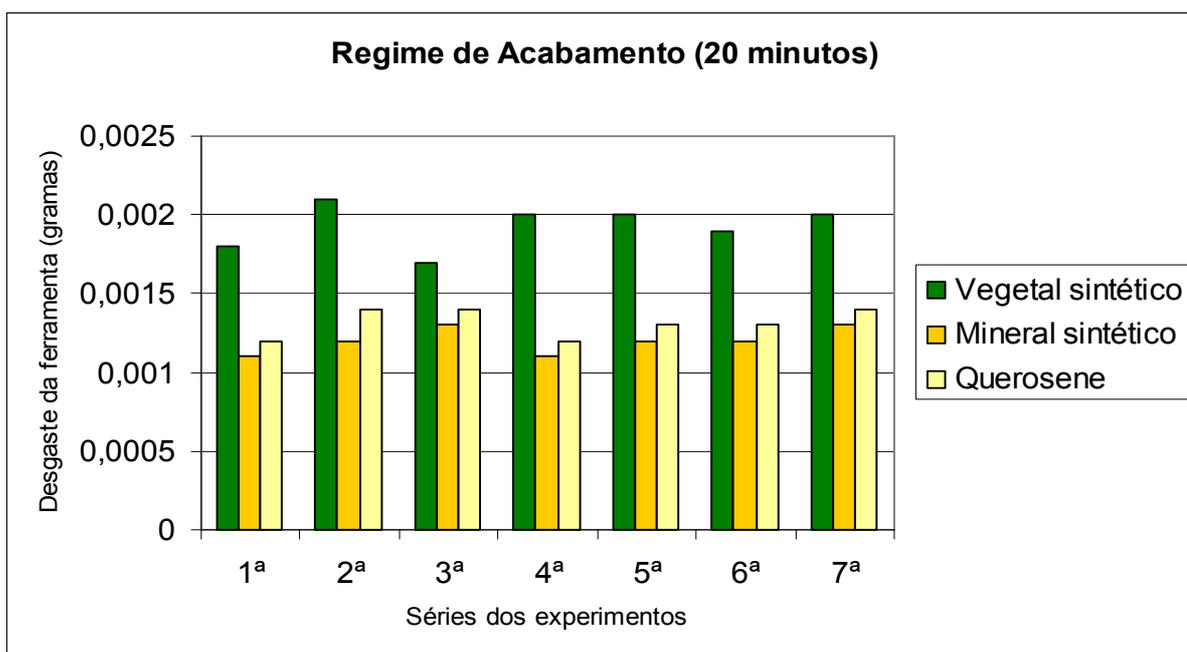


Figura 56: Gráfico dos valores da perda de massas dos sete eletrodos ferramenta no regime de acabamento.

TABELA 8

Variabilidade dos valores da perda de massa dos sete eletrodos ferramenta no regime de acabamento durante 20 minutos.

Fluido	Maior valor	Menor valor	Amplitude	Média	Variância*	Desvio Padrão
Vegetal sintético	0,0021	0,0017	0,0004	0,0019	0,000000019	0,00013
Mineral sintético	0,0013	0,0011	0,0002	0,0012	0,000000006	0,00008
Querosene	0,0014	0,0012	0,0002	0,0013	0,000000008	0,00009

*Medidas em gramas, exceto variância em g².

Observa-se que, diferentemente dos resultados no regime de desgaste, quando o vegetal retirou maior quantidade de material em relação aos outros dois e, conseqüentemente, provocou maior desgaste do eletrodo ferramenta, nesse caso em questão, apesar de retirar menos material que os outros dois fluidos, o vegetal continuou provocando um alto desgaste do eletrodo ferramenta. Esse fato comprova as observações de DiBitonto (1989) em relação à diferença da taxa de erosão entre anodo e catodo nos regimes de desbaste, onde o valor de T_{on} é alto e de acabamento, valor de T_{on} baixo.

4.2 Taxa de variação volumétrica das peças (amostras)

A figura 57 ilustra o volume de material removido no regime de trabalho de desbaste durante os tempos de trabalho 5, 10, 15 e 20 minutos para os três tipos de fluidos dielétricos utilizados no experimento. Pode-se observar que o fluido vegetal sintético teve melhor desempenho comparado aos outros dois fluidos dielétricos. O fluido mineral sintético e o querosene quase tiveram o mesmo comportamento. Observa-se, também, as curvas em ascensão, ou seja, quanto mais tempo de usinagem, maior a quantidade de material removida, porém não de maneira proporcional.

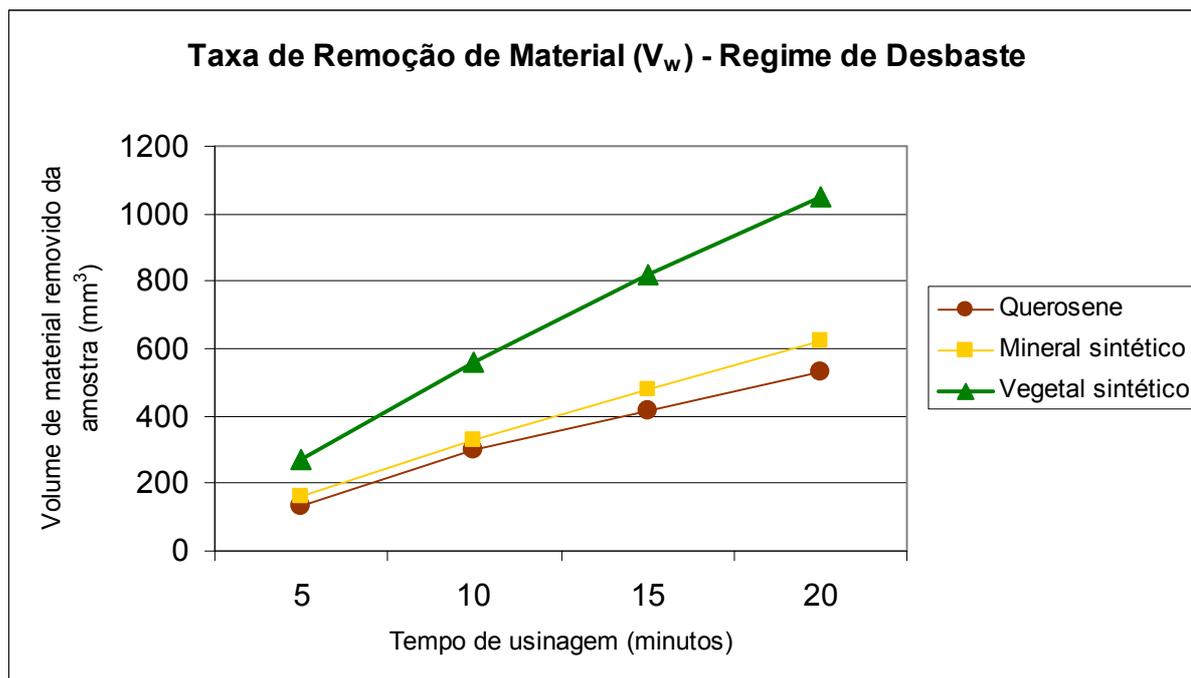


Figura 57: Gráfico do volume de material removido das amostras durante o regime de desbaste.

Provavelmente, esse aumento mais acentuado da taxa de remoção de material do vegetal sintético deve-se à maior contaminação da fenda de trabalho, devido à dificuldade de retirada das partículas erodidas, devido ao alto valor da viscosidade.

Em relação ao regime de acabamento, o comportamento do fluido mineral sintético foi melhor em relação aos demais. O querosene proporcionou maior taxa de remoção de material, aparentemente, proporcional com o aumento do tempo de usinagem, como mostra a figura 58. Já o vegetal sintético comportou-se muito bem com seus valores de taxa de remoção de material próximos dos demais para os mesmos tempos de usinagem, porém inferior à taxa do mineral sintético e ligeiramente superior à do querosene.

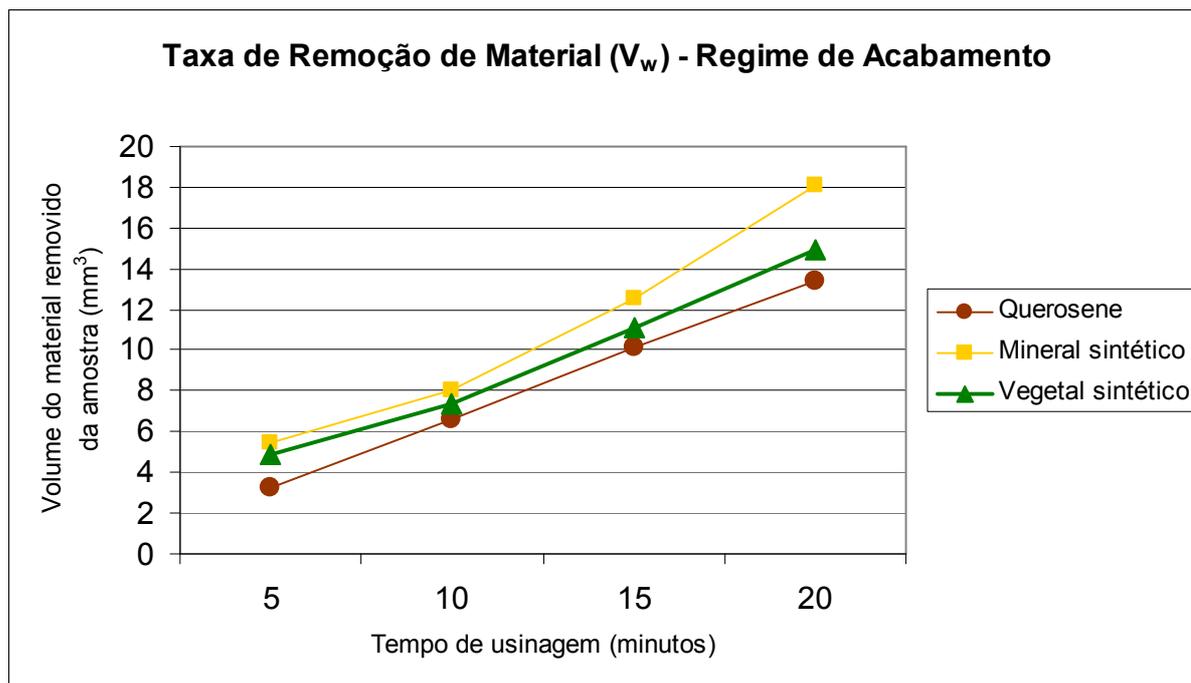


Figura 58: Gráfico do volume de material removido das amostras no regime de acabamento.

Observa-se que, nesse regime de trabalho, o vegetal sintético teve um comportamento bem parecido com os outros dois fluidos. Provavelmente, o poder de erosão dos íons positivos, para essa situação, se equivale para todos os três fluidos. Deve-se observar que, para essa condição, a fenda de trabalho é menor, quando comparada ao regime de desbaste, logo o poder de erosão diminui. No caso em questão, esse poder pode equivaler-se para os trabalhos realizados com os três fluidos dielétricos.

4.3 Variação volumétrica dos eletrodos ferramentas

Os eletrodos ferramenta foram pesados no início de cada operação de eletroerosão, após terem suas pontas torneadas, com o intuito de limpar e eliminar as crateras, provocadas pela eletroerosão anterior e depois da operação de usinagem, tendo em vista que os mesmos foram utilizados várias vezes durante os experimentos. A diferença das massas final e inicial forneceu a variação da massa (Δ_m) que, aplicada na equação (6), informou os valores do volume de desgaste da ferramenta, usados na construção dos gráficos das figuras 59 e 60.

Considerando-se a taxa de desgaste do eletrodo ferramenta no regime de desbaste, o comportamento dos fluidos mineral sintético e querosene mantiveram-se equilibrados. Já o vegetal sintético promoveu um desgaste acentuado em relação aos outros dois, mantendo o valor desse desgaste em forte ascensão, como ilustra a figura 59.

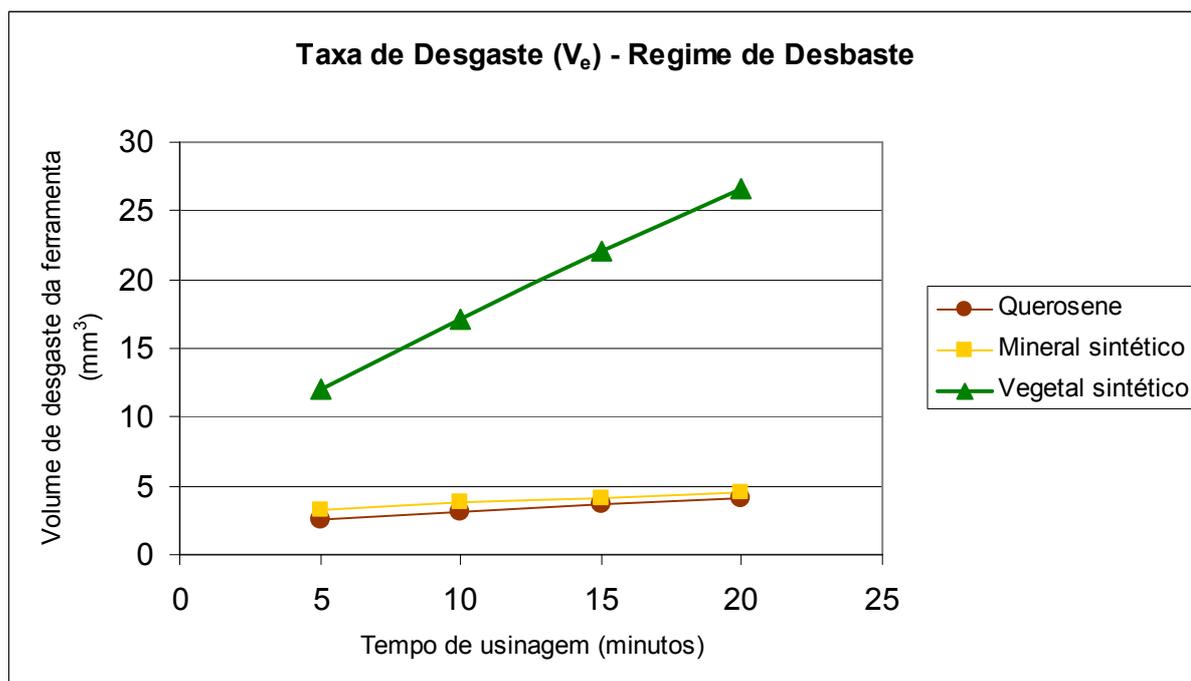


Figura 59: Gráfico do volume de desgaste do eletrodo ferramenta no regime de desbaste.

Esse gráfico reafirma o poder de destruição dos elétrons contra a superfície do eletrodo ferramenta durante o regime de trabalho de desbaste, como comentado anteriormente.

Em relação ao desgaste do eletrodo ferramenta durante o regime de acabamento, na figura 60, mostra-se o comportamento equilibrado do fluido vegetal sintético em relação ao querosene e ao mineral sintético, apesar de promover maior desgaste no eletrodo ferramenta. Observa-se, também, que o querosene provocou menor desgaste do eletrodo ferramenta, quando comparado aos demais.

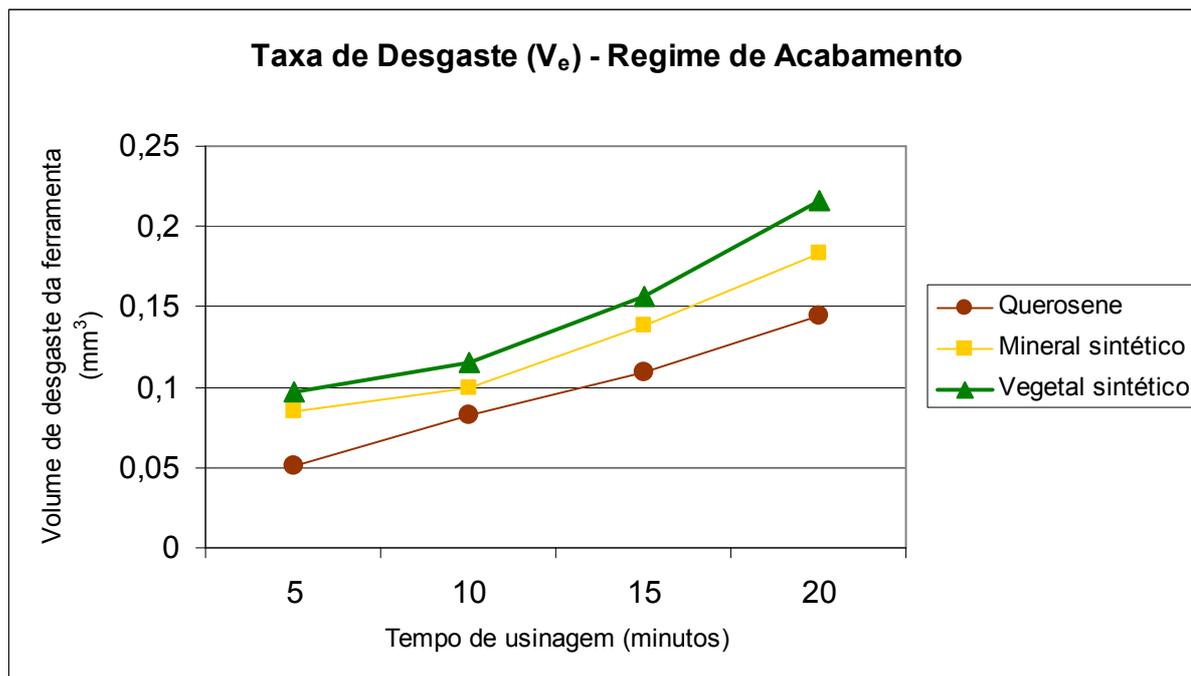


Figura 60: Gráfico do volume de desgaste do eletrodo ferramenta no regime de acabamento.

Já nessa condição, o desgaste do eletrodo ferramenta é menor, provavelmente devido à menor relação de contato se comparado ao regime de desbaste.

4.4 Desgaste volumétrico relativo

A equação (1) foi aplicada, visando-se à determinação dos valores do desgaste volumétrico relativo, valores esses utilizados na construção dos gráficos das figuras 61 e 62. No regime de desbaste (figura 61), o fluido mineral sintético teve o mesmo comportamento, quando comparado ao querosene, o que pode ser observado devido aos valores dos desgastes volumétricos relativos próximos. O vegetal sintético, por sua vez, sofreu um desgaste maior, mas acompanhando o desempenho dos outros em termos de redução desse valor. Observa-se que, à medida que o tempo de usinagem aumentava, o desgaste relativo diminuía.

No regime de acabamento (figura 62), o fluido mineral sintético teve o mesmo desempenho do querosene, repetindo o comportamento durante o regime de trabalho de desbaste. Já o vegetal sintético manteve-se com maiores valores de desgaste relativo, repetindo o comportamento do regime de desbaste.

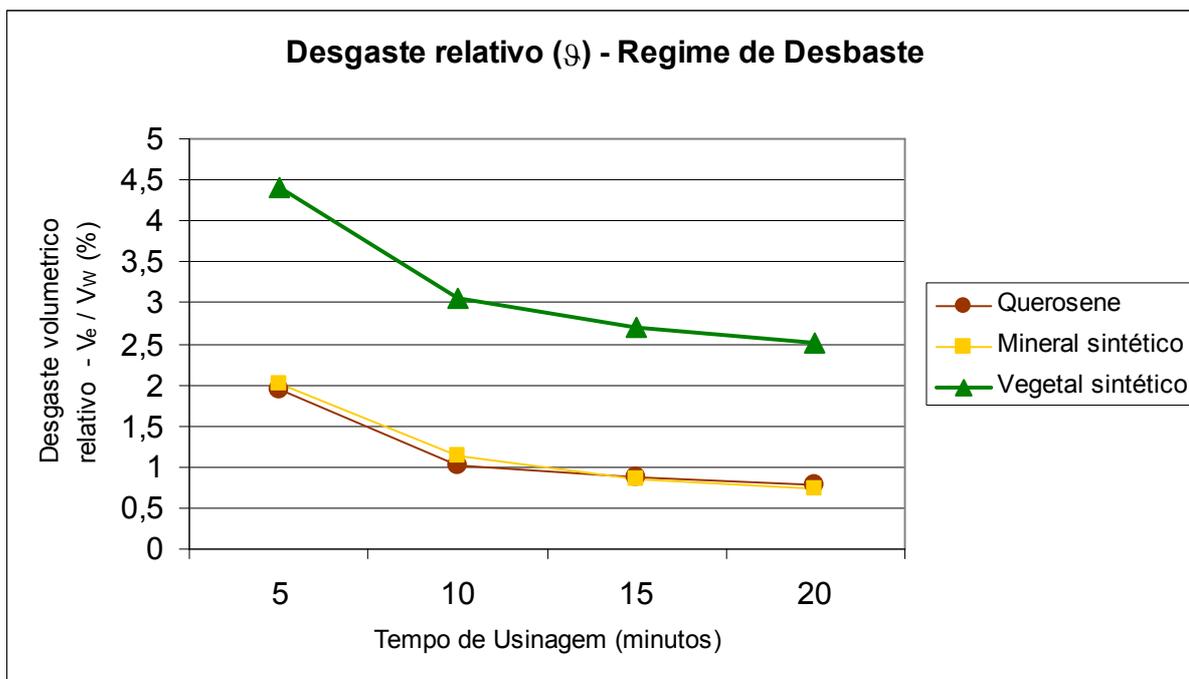


Figura 61: Gráfico do desgaste volumétrico relativo no regime de desbaste.

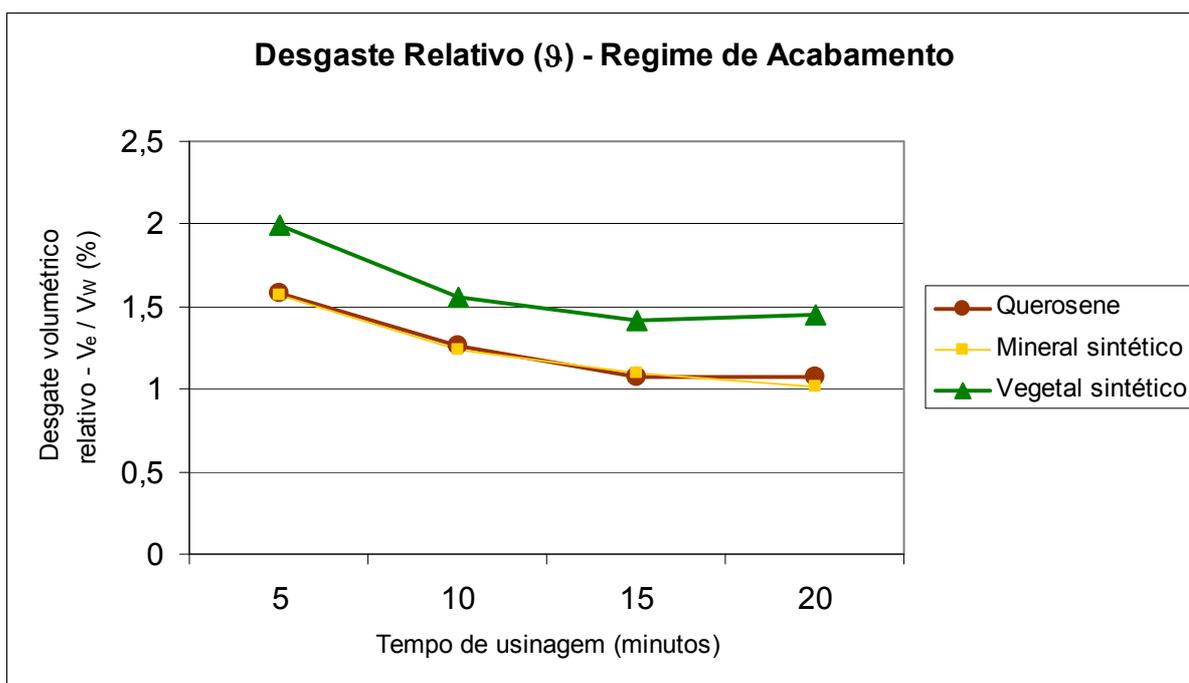


Figura 62: Gráfico do desgaste volumétrico relativo no regime de acabamento.

Esses gráficos confirmam os fatos já mencionados e analisados nos gráficos anteriores: o efeito da diferença de mobilidade dos elétrons em relação aos íons positivos e em função do tempo de duração do pulso, reportada por DiBitonto (1989). Observou-se que ocorreu uma variação bem acentuada nas taxas de erosão entre anodo e catodo nos regimes de trabalho de acabamento e desbaste. Nota-se que, no regime de trabalho de desbaste, essa relação é maior em comparação ao regime de acabamento.

4.5 Arredondamento de cantos e *over-cut*

Após os experimentos, pode-se observar a ocorrência do problema de arredondamento de cantos, nas amostras usinadas, no regime de desbaste durante 20 minutos, com os três fluidos dielétricos, como ilustra a figura 63. A primeira amostra, (a), foi usinada com querosene, a (b), com mineral sintético e a (c), com vegetal sintético. Observou-se, também, a diferença da fenda de trabalho secundária, o *over-cut*, nas amostras usinadas com os três fluidos nas mesmas condições do trabalho, o regime de desbaste durante 20 minutos. É interessante salientar que a folga secundária maior ocorreu no fluido dielétrico vegetal sintético, como mostra a figura 64(c).

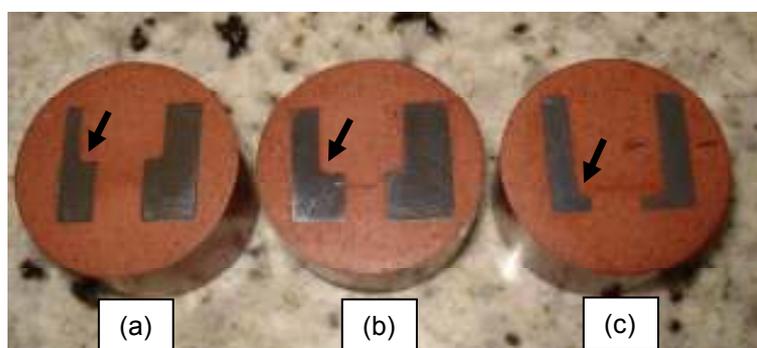


Figura 63: Arredondamento dos cantos em amostras no regime de desbaste (indicados pelas setas).

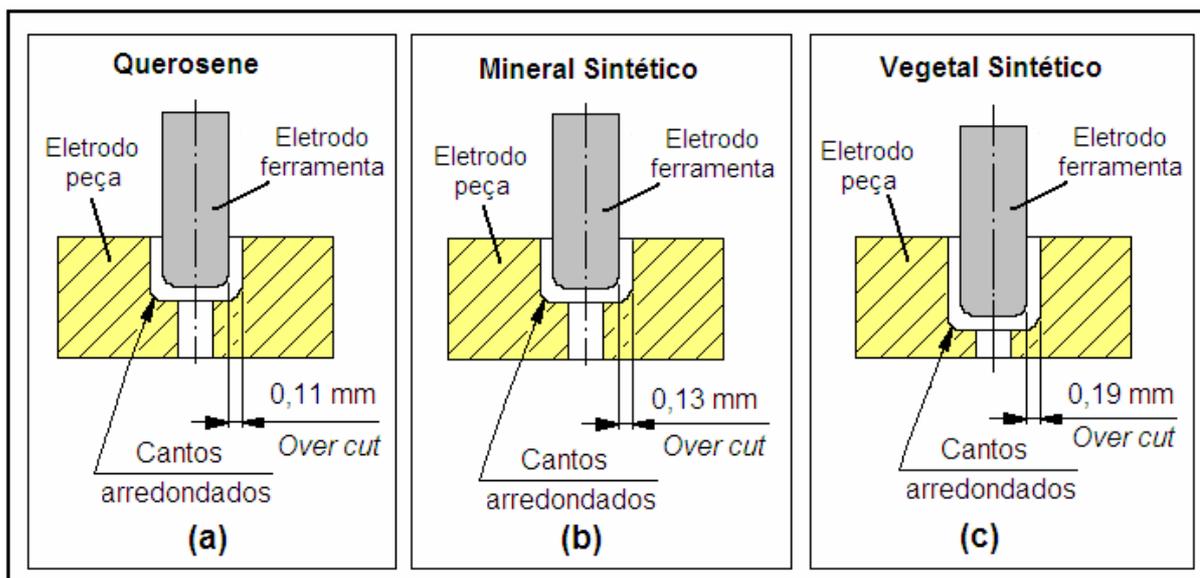


Figura 64: *Over-cut* em amostras no regime de desbaste.

A ocorrência de *over-cut*, com maior valor na peça usinada com fluido vegetal sintético, confirma a maior condição de erosão desse fluido. Provavelmente, as partículas erodidas retiradas da fenda de trabalho, que saíram pela região da folga lateral entre eletrodos, tenham produzido uma erosão secundária mais intensa neste tipo de fluido se comparada aos demais. Observa-se o tamanho da folga de trabalho lateral maior no fluido vegetal sintético, estabelecida pela máquina de eletroerosão de acordo com as condições de trabalho selecionadas pelo operador da máquina (ENGEMAQ, 2002).

4.6 Rugosidade

Todas as amostras usinadas, durante o regime de trabalho de acabamento, tiveram o valor de rugosidade medidas no fundo das superfícies. O fluido mineral sintético promoveu o menor valor de rugosidade, durante esse regime de trabalho em todos os tempos, quando comparado aos outros fluidos, com um R_a próximo de $3 \mu\text{m}$, como mostra a figura 65. O querosene produziu o pior acabamento com R_a de, aproximadamente, $5 \mu\text{m}$. Já o vegetal sintético ficou numa posição intermediária com $R_a = 3,8 \mu\text{m}$.

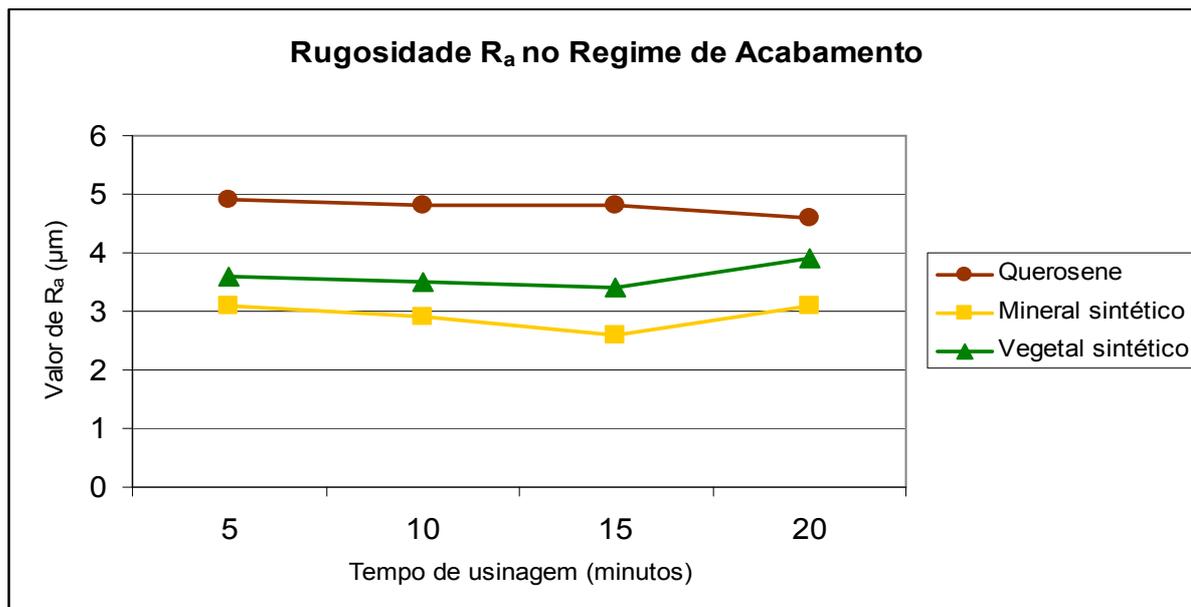


Figura 65: Gráfico comparativo do valor da rugosidade R_a no regime de trabalho de acabamento.

O efeito das descargas elétricas não é intenso nessa condição de trabalho, logo o comportamento dos três fluidos durante a eletroerosão é semelhante.

A figura 66 mostra o valor de rugosidade em R_z , mantendo o comportamento, em termos de acabamento superficial indicado pelo parâmetro R_a , ou seja, o fluido mineral sintético melhor, acompanhado do vegetal sintético e, por último, com pior comportamento, o que significa um maior valor de rugosidade, entre os três, o querosene, isso para o regime de trabalho de acabamento.

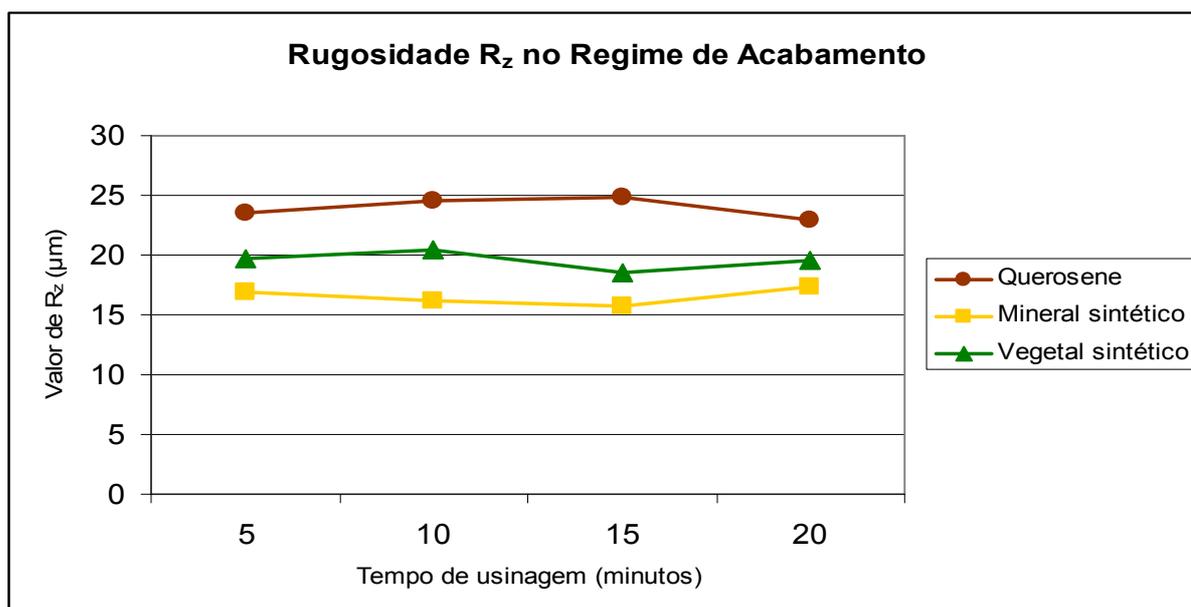


Figura 66: Gráfico comparativo do valor da rugosidade R_z no regime de trabalho de acabamento.

No regime de trabalho de desbaste, somente as amostras produzidas pelo tempo de eletroerosão de 20 minutos tiveram a rugosidade medida. Isso se deve ao fato de a medição ter sido realizada na parede do furo. A obtenção de uma profundidade mínima para essa medição, que é de aproximadamente 10 mm, ocorre apenas após 20 minutos, para os fluidos, mineral sintético e querosene. Os demais tempos produziram profundidades menores. Por esse motivo, só foram realizadas sete medições para cada fluido no regime de desbaste. O gráfico da figura 67 ilustra a variabilidade dos valores de rugosidade R_a durante as séries de experimentos para esse regime com 20 minutos de eletroerosão. Aparentemente, os três fluidos comportaram-se de maneira semelhante, com relação à variabilidade, porém, aqui, o vegetal sintético promoveu um pior acabamento em comparação com os outros dois. O querosene foi o que teve o melhor desempenho. A tabela 9 ilustra a variabilidade dos resultados de rugosidade R_a . As amostras usinadas com querosene apresentaram menor variação em relação às amostras obtidas com mineral sintético e vegetal, sendo que os dois últimos forneceram valores variância bem próximos. A figura 68 mostra o diagrama, evidenciando os resultados da tabela 9: maior amplitude nos resultados das amostras usinadas com vegetal sintético, seguido do mineral sintético. O querosene foi o que apresentou amostras com menor amplitude nos valores de rugosidade R_a .

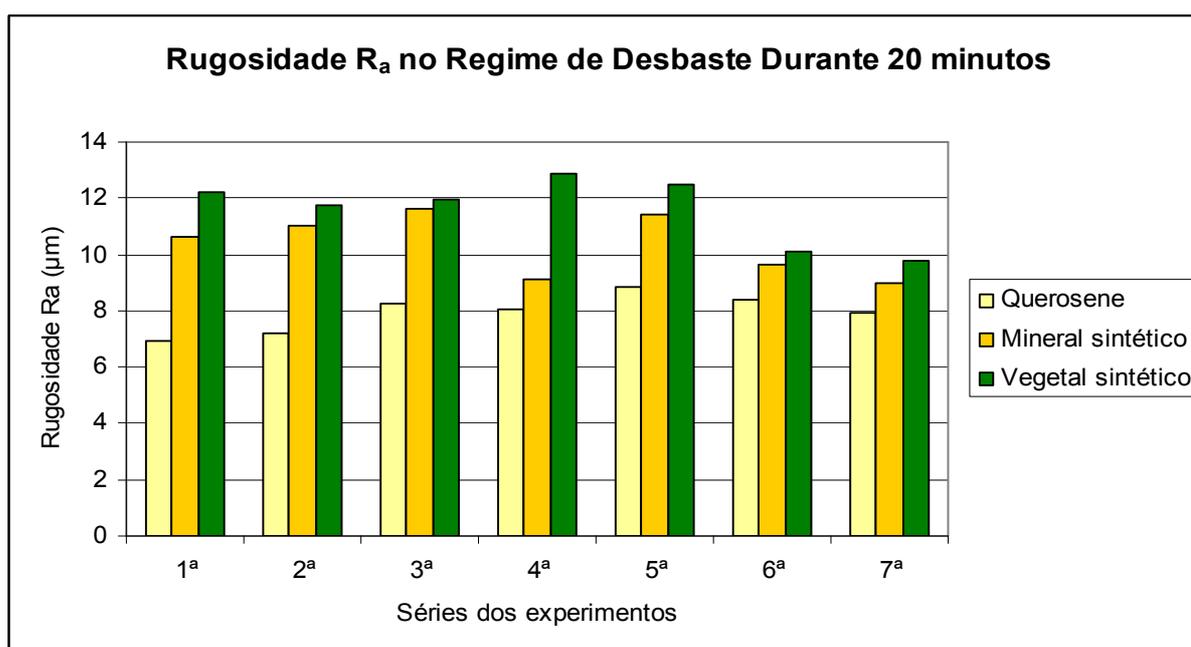
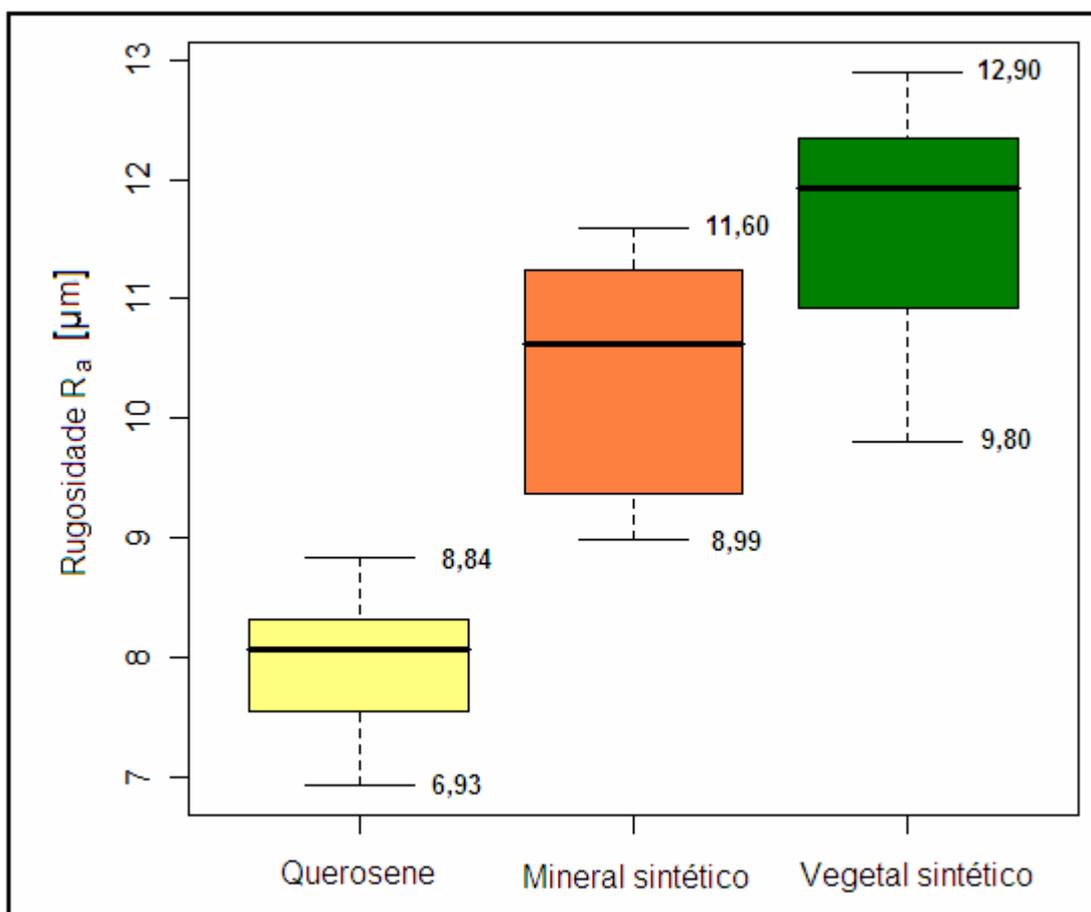


Figura 67: Gráfico do valor da rugosidade R_a no regime de trabalho de desbaste durante 20 minutos de eletroerosão.

TABELA 9

Variabilidade dos valores rugosidade R_a das sete amostras no regime de desbaste.

Fluido	Maior valor	Menor valor	Amplitude	Média	Variância*	Desvio padrão
Querosene	8,84	6,93	1,91	7,94	0,45	0,67
Mineral sintético	11,60	8,99	2,61	10,35	1,20	1,09
Vegetal sintético	12,90	9,80	3,10	11,60	1,43	1,19

*Medidas em μm , exceto variância em $(\mu\text{m})^2$.Figura 68: Gráfico *box plot* dos valores de rugosidade R_a para amostras no regime de desbaste.

A figura 69 ilustra a variabilidade do valor de R_z , entre as séries dos experimentos para o tempo de 20 minutos de trabalho, confirmando os valores de rugosidade do parâmetro R_a . A tabela 10 mostra o comportamento mais estável do querosene, no regime trabalho de desbaste, evidenciado pelos valores de amplitude e variância, que foram bem menores do que os encontrados nas amostras usinadas com os outros dois fluidos, sendo que o mineral sintético, apesar de fornecer um valor de rugosidade R_z menor que o fluido vegetal sintético, foi o que apresentou maior variabilidade nos resultados. O gráfico da figura 70 ilustra os resultados da tabela 10.

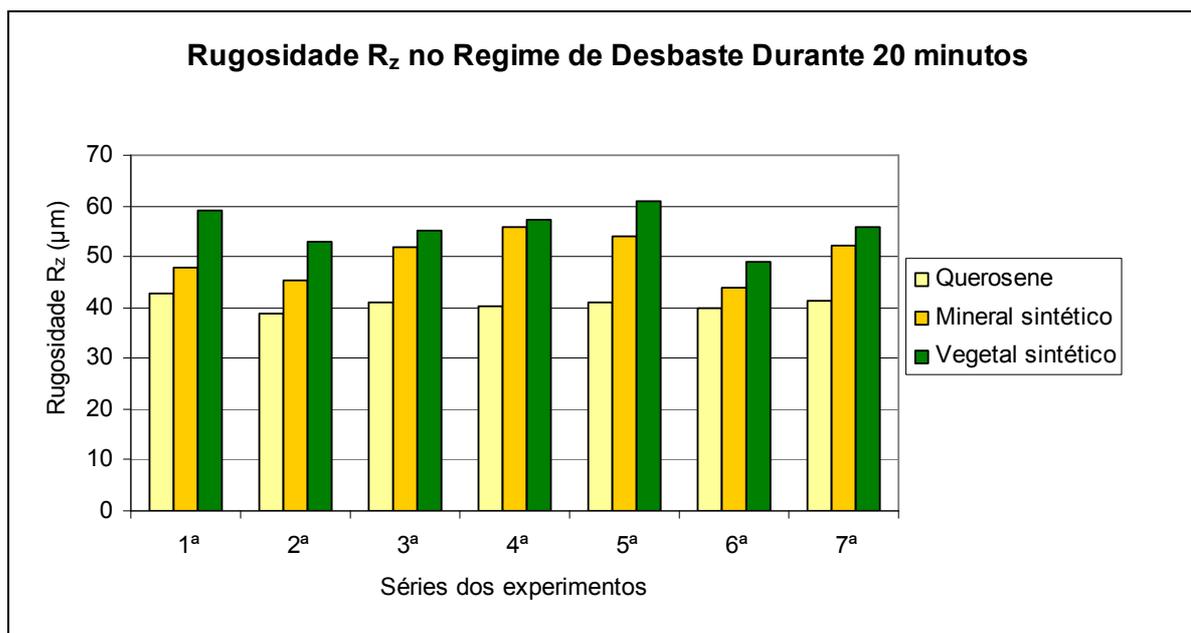


Figura 69: Gráfico do valor da rugosidade R_z no regime de trabalho de desbaste durante 20 minutos de eletroerosão.

TABELA 10

Variabilidade dos valores rugosidade R_z das sete amostras no regime de desbaste.

	Maior valor	Menor valor	Amplitude	Média	Variância*	Desvio padrão
Querosene	42,80	38,96	3,84	40,76	1,46	1,21
Mineral sintético	55,86	44,03	11,83	50,14	20,15	4,49
Vegetal sintético	60,96	48,96	12,00	55,73	15,86	3,98

*Medidas em μm , exceto variância em $(\mu\text{m})^2$.

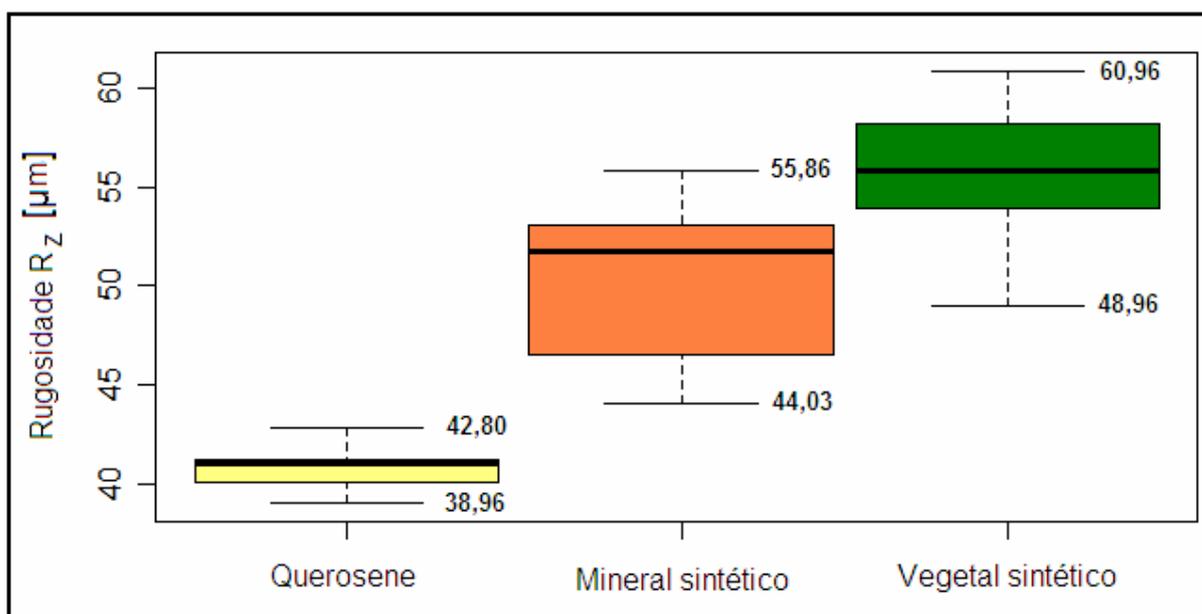


Figura 70 – Gráfico *box plot* dos valores de rugosidade R_z para amostras no regime de desbaste.

4.7 Morfologia da superfície da cavidade

As figuras 71, 72 e 73 ilustram a seção transversal da superfície usinada de amostras trabalhadas no regime de acabamento com os três fluidos, a primeira corresponde ao querosene, a segunda, ao mineral sintético e a terceira, ao vegetal sintético. Pode-se notar a formação da zona branca que destaca-se em todas as três situações, com um tamanho de, aproximadamente, 8 μm para as três condições, bem como o comportamento uniforme dessa zona branca ao longo da superfície. Ocorreu o surgimento de micro-trincas em amostras usinadas com os três tipos de fluidos.

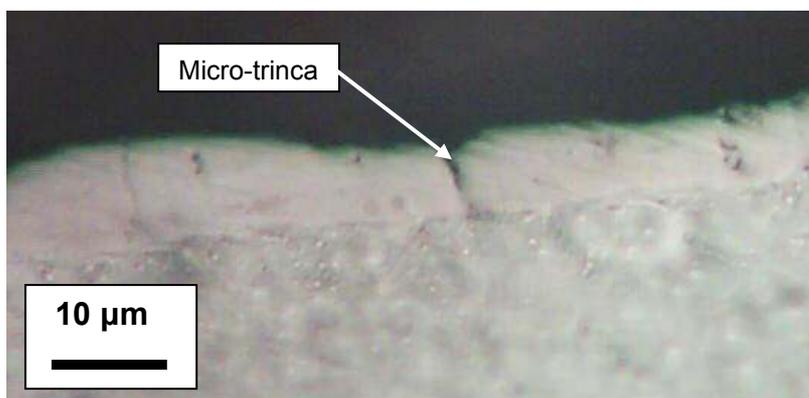


Figura 71: Zona branca produzida pela eletroerosão com querosene no regime de trabalho de acabamento.

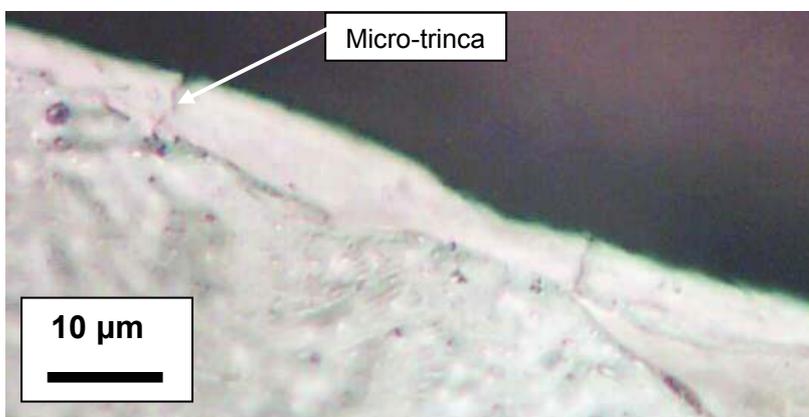


Figura 72: Zona branca produzida pela eletroerosão com fluido mineral sintético no regime de trabalho de acabamento.

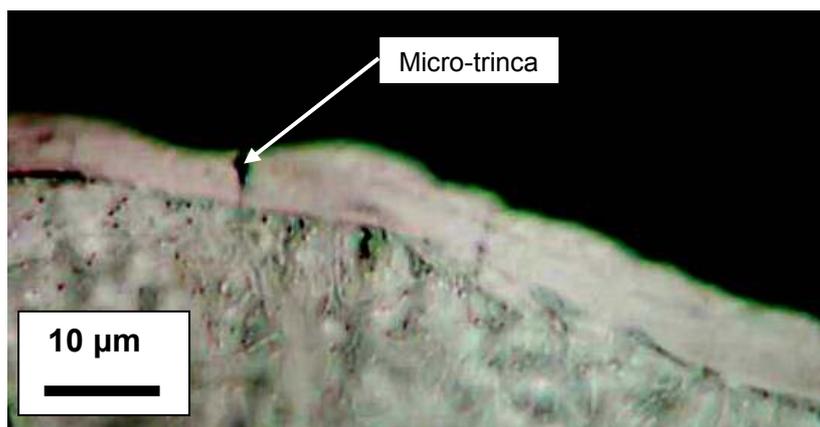


Figura 73: Zona branca produzida pela eletroerosão com fluido vegetal sintético no regime de trabalho de acabamento.

As figuras 74, 75 e 76 ilustram a seção transversal da superfície de amostras usinadas no regime de trabalho de desbaste. A zona branca aparece em destaque em todas as situações, novamente, contendo ainda micro-trincas e poros também evidentes. A figura 74 foi usinada com querosene, a 75, com mineral sintético e a 76, com vegetal sintético. Agora, a espessura média é de aproximadamente 30 micrometros com comportamento não uniforme, diferente do regime de acabamento, ou seja, em algumas regiões a zona branca aparece quebrada.

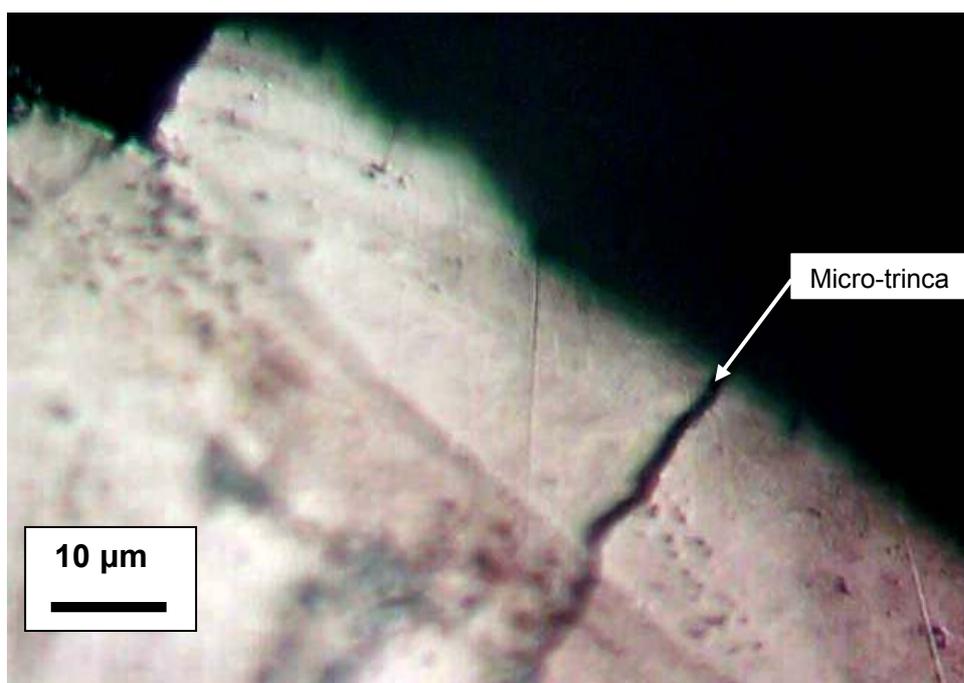


Figura 74: Zona branca produzida pela eletroerosão com querosene no regime de trabalho de desbaste.

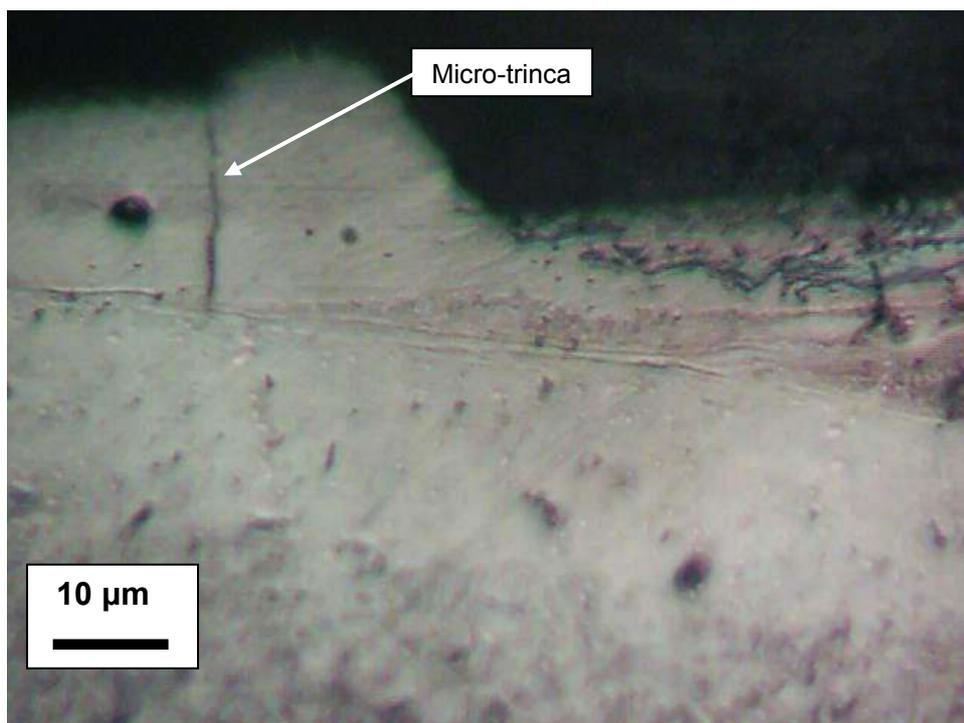


Figura 75: Zona branca produzida pela eletroerosão com fluido mineral sintético no regime de trabalho de desbaste.

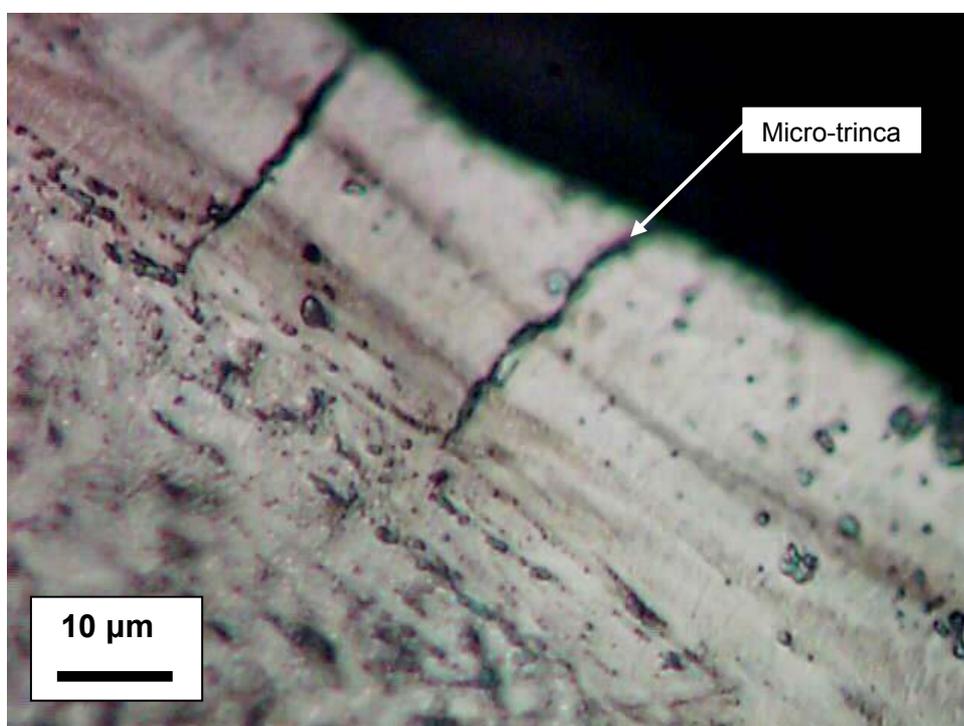


Figura 76: Zona branca produzida pela eletroerosão com fluido vegetal sintético no regime de trabalho de desbaste.

Pode-se afirmar que os três fluidos produziram zonas brancas de mesma dimensão e condição nos dois regimes de trabalho, pouco espessa e constante no regime de acabamento e muito espessa e não uniforme no regime de desbaste.

As figuras 77, 78 e 79 mostram as superfícies das amostras usinadas no regime de acabamento vistas de cima com auxílio de microscopia eletrônica de varredura. Em todas as situações, surgiram trincas superficiais e poros, além do acúmulo de partículas erodidas, aderidas sobre as superfícies. As superfícies do vegetal sintético e do mineral sintético são bem parecidas em termos de formação das crateras. Aparentemente, nos fluidos vegetal e querosene, ocorreram mais micro-trincas do que no mineral sintético.

A superfície da amostra usinada com fluido vegetal sintético não difere das usinadas com os outros fluidos, a mesma assemelha-se à produzida pelo fluido mineral sintético, surgiram micro-trincas e poros semelhantes, bem como ocorreram inclusões de partículas erodidas sobre a superfície.

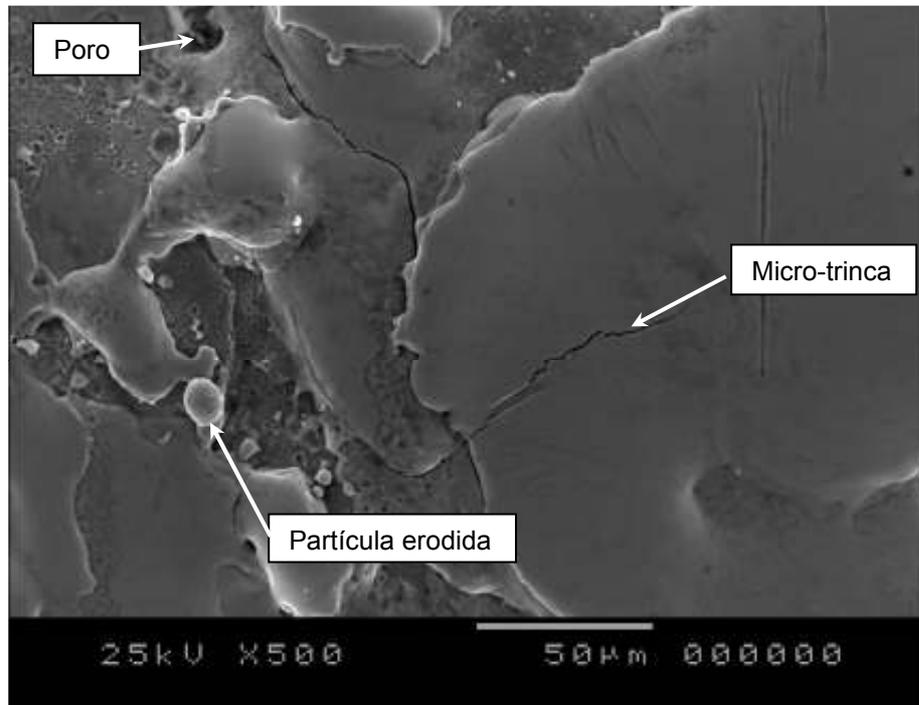


Figura 77: Superfície produzida pela eletroerosão com querosene no regime de trabalho de acabamento.

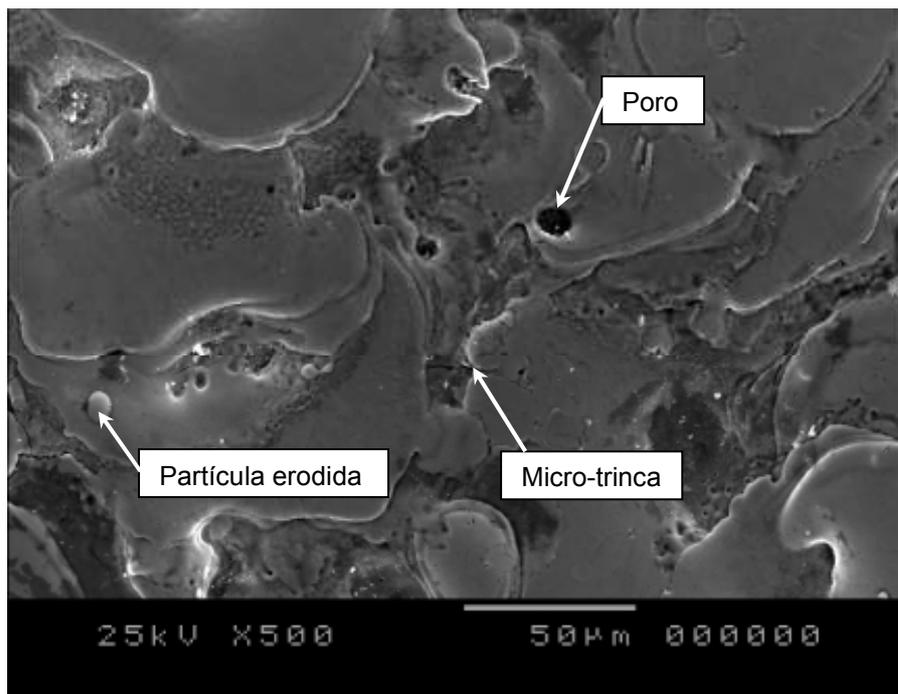


Figura 78: Superfície produzida pela eletroerosão com mineral sintético no regime de trabalho de acabamento.

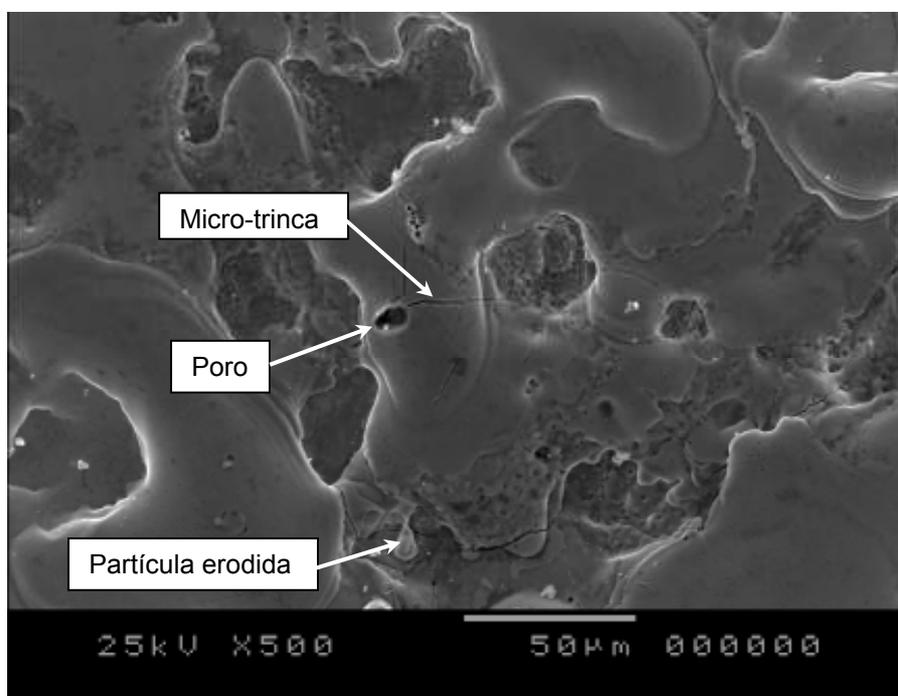


Figura 79: Superfície produzida pela eletroerosão com vegetal sintético no regime de trabalho de acabamento.

No regime de desbaste, aparentemente, muitas partículas ficaram aderidas na superfície usinada. Surgiram, também, micro-trincas e poros, como ocorreu no regime de acabamento, porém, nesse caso, aparentemente, surgiu uma quantidade maior de partículas aderidas sobre a superfície da peças usinadas com fluido dielétrico vegetal sintético. As figuras 80, 81 e 82 mostram fotos das superfícies erodidas no regime de trabalho de desbaste, feitas com o Microscópio Eletrônico de Varredura. A figura 80 é referente a uma superfície usinada com querosene, a 81, usinada com mineral sintético e a 82, erodida com fluido dielétrico vegetal sintético.

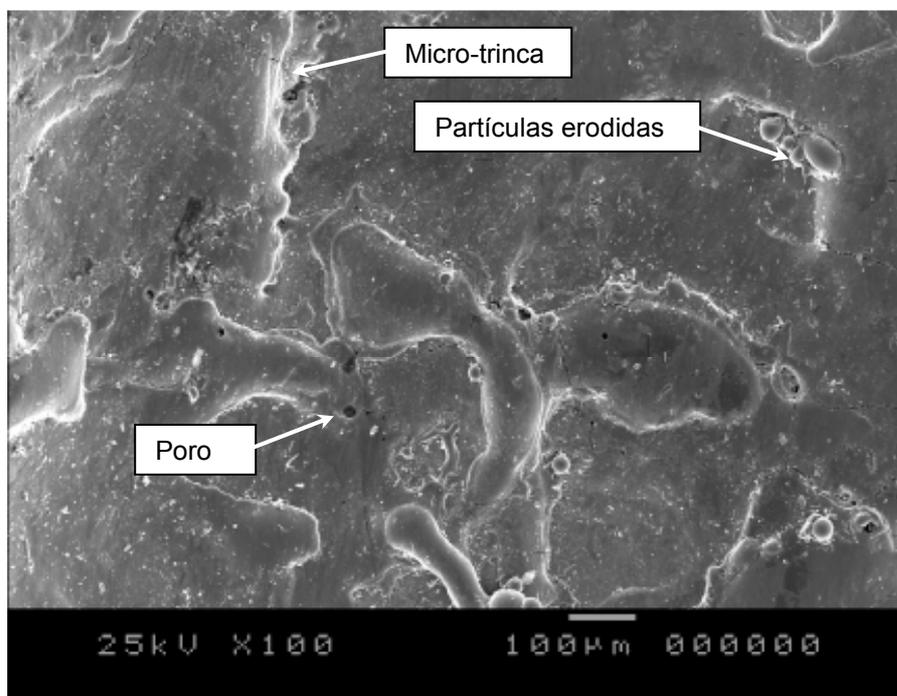


Figura 80: Superfície produzida pela eletroerosão com querosene no regime de trabalho de desbaste.

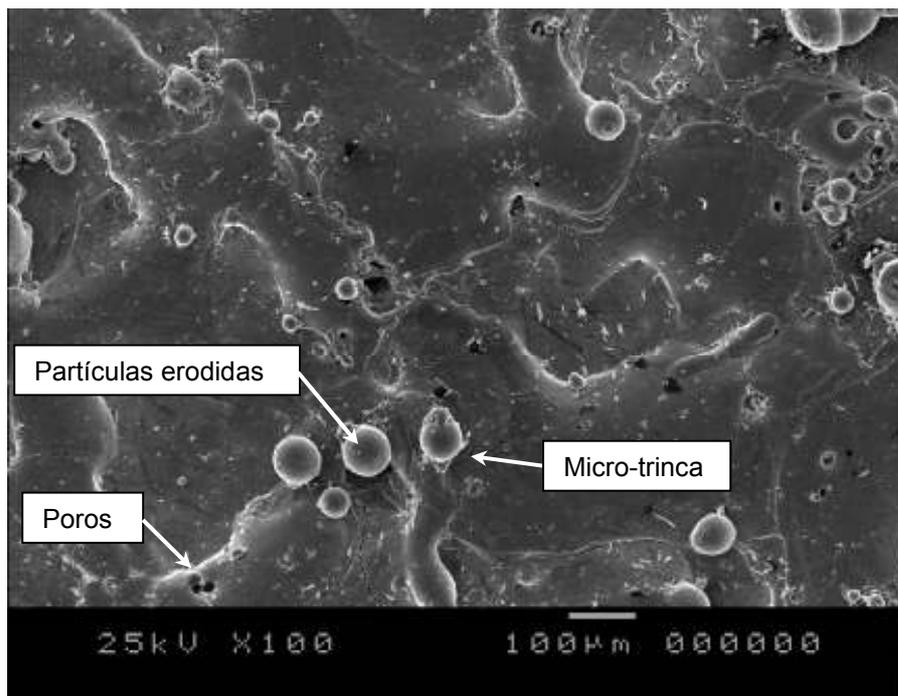


Figura 81: Superfície produzida pela eletroerosão com mineral sintético no regime de trabalho de desbaste.

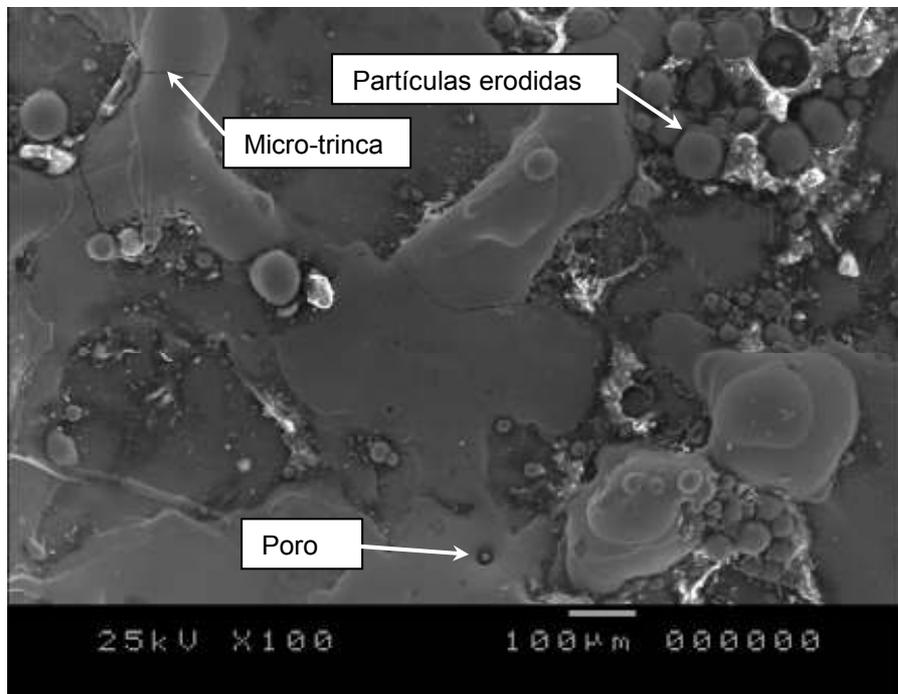
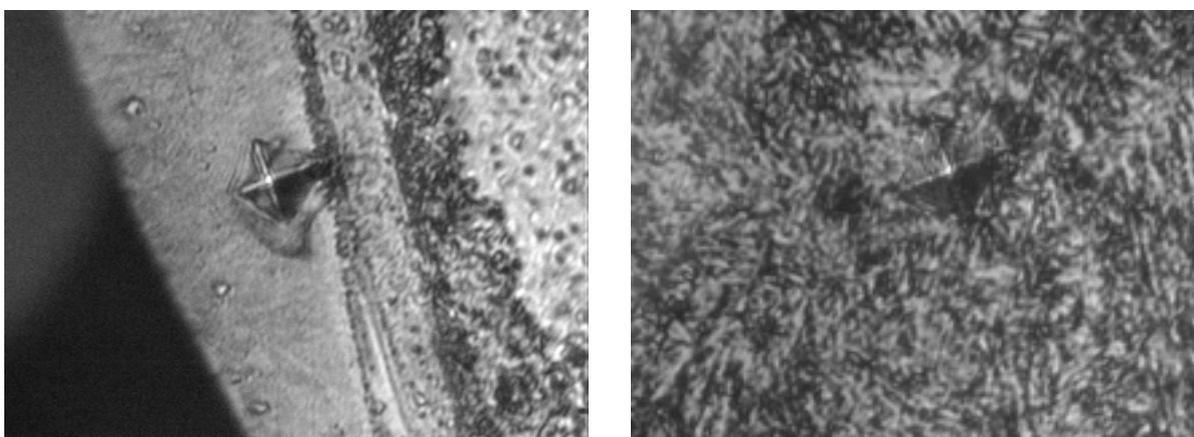


Figura 82: Superfície produzida pela eletroerosão com vegetal sintético no regime de trabalho de desbaste.

Provavelmente o fato de maior quantidade de partículas erodidas aderirem sobre a superfície usinada com vegetal sintético, pode ter ocorrido em função da dificuldade de retirada das mesmas da fenda de trabalho, devido à alta viscosidade do mesmo, além da menor condição de arrefecimento do mesmo em relação aos outros fluidos.

4.8 Micro-dureza na região termicamente afetada pelo calor

Variações no valor de micro-dureza na zona branca próxima da região termicamente afetada pelo calor em relação ao substrato foram observadas em amostras usinadas pelos três fluidos dielétricos, no regime de desbaste. As figuras 83, 84 e 85 ilustram as impressões deixadas pelo penetrador na região próxima da zona termicamente afetada pelo calor em (a) e no substrato em (b). A figura 83 é referente a uma amostra usinada com querosene, 84, fluido mineral sintético e 85, vegetal sintético. A tabela 11 reporta aos valores de dureza encontrados. Os valores evidenciam as alterações nos valores de dureza nas regiões observadas em relação ao substrato, observado, anteriormente, por alguns pesquisadores (Amorim, 2002 e Ferreira, 2006).



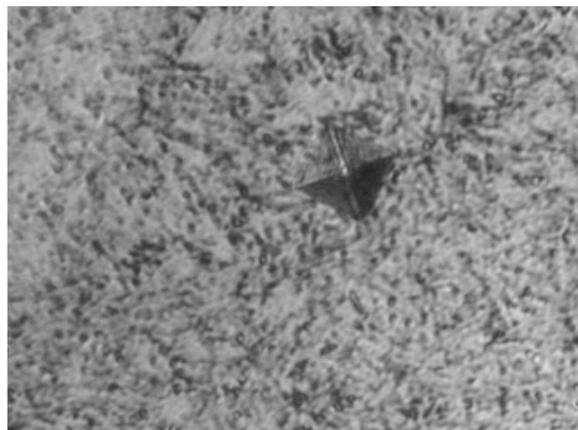
(a)

(b)

Figura 83: Micro-dureza de amostra usinada com querosene no regime de desbaste.

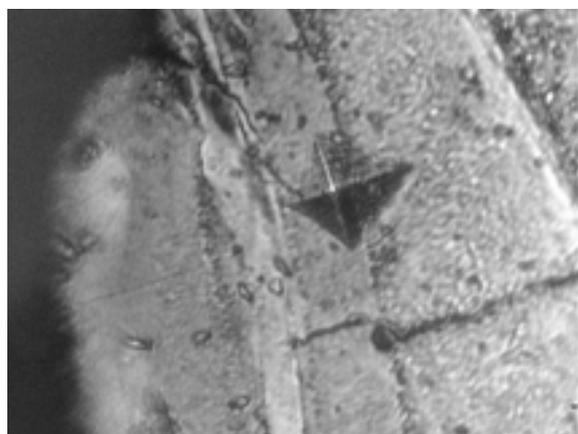


(a)

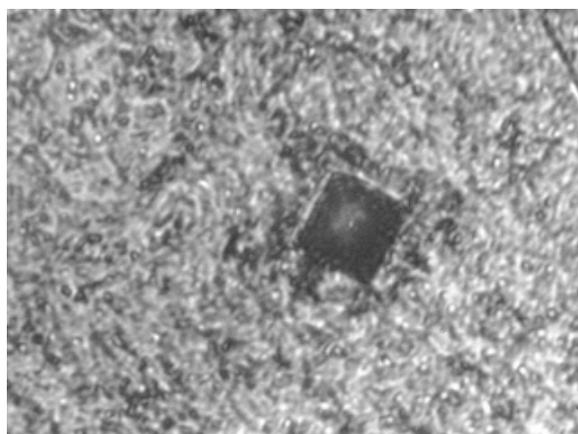


(b)

Figura 84: Micro-dureza de amostra usinada com mineral sintético no regime de desbaste.



(a)



(b)

Figura 85: Micro-dureza de amostra usinada com vegetal sintético no regime de desbaste.

TABELA 11

Valores de micro-dureza Vickers nas amostras usinadas pelos três fluidos no regime de desbaste.

Amostra	Zona branca	Substrato
Querosene	683	637
Mineral sintético	663	631
Vegetal sintético	689	634

Medidas em kgf/mm^2 .

Considerando-se as alterações nos valores de dureza nas amostras usinadas com mineral sintético, querosene e vegetal sintético, ocorreram poucas variações nesses valores de 5%, 7% e 9%, respectivamente, a mais na zona termicamente afetada pelo calor em relação ao substrato, como mostra a tabela 11.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS GERAIS

Este capítulo apresenta as conclusões baseadas nos resultados dos experimentos realizados, comentários gerais e sugestões para futuros trabalhos.

5.1 Conclusões

Depois de desenvolvido o trabalho, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- ▶ O fluido vegetal sintético apresentou taxa de remoção de material no regime de desbaste mais alta do que os fluidos mineral sintético e querosene, mantendo variabilidade dos resultados durante as séries de experimentos pouco maior em relação aos outros fluidos. Já no regime de acabamento, essa taxa ficou com valor baixo em relação aos outros dois fluidos;
- ▶ As taxas de desgaste do eletrodo ferramenta nos dois regimes de trabalho foram maiores nas ferramentas usadas na eletroerosão com fluido vegetal sintético. Comparando-se querosene e mineral sintético, seus valores mantiveram-se bem próximos;
- ▶ Como consequência da alta taxa de desgaste, tanto no regime de desbaste como no acabamento, o desgaste volumétrico relativo das peças usinadas com o fluido vegetal sintético foi maior quando comparado aos outros dois fluidos;

- ▶ A rugosidade, na periferia do furo usinado durante o regime de desbaste, foi maior nas amostras que trabalharam com o fluido vegetal sintético em relação ao mineral sintético e o querosene. Sendo que o querosene produziu menor valor de rugosidade;
- ▶ No regime de acabamento, a rugosidade, medida no fundo da cavidade usinada com querosene, promoveu melhor acabamento, já que valor de rugosidade ficou menor em relação ao mineral sintético seguido do vegetal sintético;
- ▶ Ocorreu maior valor de *over-cut*, durante o regime de desbaste na usinagem com fluido vegetal sintético, em relação ao mineral sintético e ao querosene que promoveu menor valor.
- ▶ Em relação à formação de zona branca, poros e micro-trincas, os três fluidos comportaram-se de maneira bem parecida, tanto durante o regime de trabalho de acabamento, com formação da zona branca com espessura de aproximadamente 8 μm , como na condição de desbaste com espessura de 30 μm , aproximadamente. Ocorreram formações de micro-trincas e poros nas amostra usinadas com os três fluidos;
- ▶ Partículas erodidas aderiram-se sobre a superfície usinada com os três fluidos nos regimes de acabamento e desgaste aproximadamente na mesma proporção, exceto na superfície usinada com fluido vegetal sintético durante o regime de desbaste. Aparentemente, ocorreu maior aderência de partículas erodidas, como mostrado na microscopia eletrônica de varredura;
- ▶ Pequena variação no valor da microdureza do substrato em relação à zona branca foi observada nas amostras usinadas com os três fluidos, não ocorrendo nenhuma variação que devesse ser destacada.

5.2 Comentários gerais

No início dos experimentos, com o querosene, seguido do mineral sintético, os sistemas de alimentação e retorno funcionaram satisfatoriamente, porém durante os trabalhos realizados com vegetal sintético, o retorno ficou comprometido, ou seja a quantidade de fluido necessária para manter a cuba cheia sem transbordar não retornava para o reservatório. O problema foi sanado com a abertura total do registro de gaveta, que controla a saída de fluido da cuba auxiliar. Esse inconveniente deve-se à viscosidade do fluido vegetal, mais alta que nos outros dois. Eliminando-se esse problema, durante os trabalhos, tanto no regime de desgaste, quanto no de acabamento, o fluido vegetal sintético comportou-se muito bem.

Levando-se em conta a remoção de material da peça, o vegetal sintético teve o melhor desempenho comparado aos outros fluidos, no regime de desgaste, porém essa performance provocou o inconveniente de promover maior desgaste da ferramenta. Comparando-se o desgaste volumétrico relativo para os três fluidos, o ganho com relação à taxa de remoção de material do fluido vegetal sintético não foi compatível aos outros fluidos. Já que, a maior taxa de remoção de material promovida pelo fluido vegetal sintético acarretou um alto desgaste do eletrodo ferramenta. Provavelmente, o maior valor da densidade seja a responsável por esse poder de “destruição” das superfícies, já que a mesma influencia a formação do canal de plasma. A viscosidade alta também pode interferir no processo, dificultando a retirada de partículas erodidas da fenda de trabalho, bem como o arrefecimento do conjunto de eletrodos peça e ferramenta.

5.3 Sugestões para futuros trabalhos

- ▶ Investigar provável combinação adequada entre os tempos T_{on} e T_{off} , para a eletroerosão por penetração do fluido vegetal sintético que promovam boa taxa de remoção de material com o mínimo valor de taxa de desgaste;

- ▶ Avaliar os efeitos da variação de corrente na eletroerosão por penetração do fluido vegetal sintético que promova baixo desgaste volumétrico relativo;

- ▶ Testar sistemas de filtragem para o fluido vegetal sintético para transformadores, que possa trabalhar na máquina de eletroerosão por penetração;
- ▶ Comparar a performance de outros fluidos vegetais para transformadores na usinagem de eletroerosão por penetração.
- ▶ Comparar a eletroerosão de eletrodos ferramenta confeccionados com materiais diferentes (por exemplo, grafita e cobre) usando o fluido vegetal sintético.
- ▶ Avaliar a influência da variação da relação de contato na eletroerosão com fluido vegetal sintético nos regimes de acabamento e desbaste.
- ▶ Investigar o tamanho do canal de plasma, formado pelo fluido vegetal sintético em comparação aos outros fluidos mineral sintético e querosene.

REFERÊNCIAS

AMORIM, F. L. **Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 8000 e da liga de cobre CuBe para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**. 2002. 147f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.

AMORIM, F. L. Desempenho de eletrodo de grafita e de cobre no acabamento de aço ferramenta. **Revista Máquina e Ferramenta**. São Paulo: Arada Editora, Ano 42, n.485, p. 124-142, jun. 2006.

ARANTES, Luciano José. **Avaliação de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. 2001. 74f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ARANTES, Luciano José; SILVA, Márcio Bacci da; SILVA, Evaldo Malaquias da; RASLAN, Alberto Arnaldo. Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Uberlândia, maio. 2003.

ARAÚJO, Daniel C. P.; MARTINS, Álvaro J. A.; SILVA, Neynard A. **As vantagens da revitalização de transformadores de potência utilizando repotenciação e óleo vegetal**. Disponível em: <<http://www.google.com.br>>. Acesso em: 10 mar. 2007.

BENEDICT, Gary F. **Nontraditional manufacturing processes**. New York: Marcel Dekker, 1987. p. 207-229.

CHEN, S. L; YAN, B.H; HUANG, F. Y. Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V. **Journal of Materials Processing Technology**, Taiwan, n. 87, p. 107-111, aug. 1997.

CUSANELLI, G.; HESSLER-WYSER, A.; BOBARD, F.; DEMELLAYER, R.; PEREZ, R.; FLÜKIGER, R. Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique. **Journal of materials processing technology**, Geneva, n. 149, p. 289-295, 2004.

DESCOEUDRES, Antonie. **Characterization of electrical discharge machining plasmas**. These (Docteur ès sciences). 2006. 125f. École Polytechnique Federale de Lausanne, Lusanne.

DIBITONTO, Daryl D.; EUBANK, Philip T.; PATEL, Mukund R.; BARRUFET, Maria A. Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model. **American Institute of Physics**. n. 9, v. 66, nov. 1989.

ENGEMAQ. **Manual de instalação, operação e manutenção da máquina EDM 440 NC**. Caxias do Sul: Agie Charmilles Ltda, 2002. 95p.

FAVORIT AÇOS ESPECIAIS. Disponível em: <<http://www.favorit.com.br>>. Acesso em: 30 mar. 2007.

FULLER, John E. **Electrical Discharge Machining, Metals Handbook**. 9.ed. 1989. v.16, p. 557-564.

FERREIRA, José Carvalho. **A study of die helical thread cavity surface finish made by Cu-W electrodes with planetary EDM**. Springer-Verlag London Limited, fev. 2006.

GHANEM, F.; BRAHAM C.; SIDHOM H. Influence of steel type on electrical discharge machined surface integrity. **Journal of materials processing technology**, Tunis, n. 142, p. 163-173, 2003.

GUITRAU, E. Bud. **The electrical discharge machining handbook**. Cincinnati: Hanser Gardner Publications. 2007.

JAMESON, Elman C. **Electrical discharge machining**. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2001. Cap. 1, p. 1-21.

LEÃO, Fábio N.; PASHBY, Ian R. **A review on the use of environmentally-Friendly dielectrical fluids in electrical discharge machining**. Urbelândia. Out. 2003.

LEE, Yung-Li; PAN, Jwo; HATHAWAY, Richard B.; BARKEY, Mark E. **Fatigue testing and analysis (Theory and practice)**. Burlington: Elsevier, 2005. p. 107-110.

MARTINS, Marcelo Neves. **Fluido dielétrico à base de éster natural**. Disponível em: <<http://www.eletropaulo.com.br>>. Acesso em: 30 maio. 2007.

MCGEOUGH, J. A. **Advanced methods of machining**. London: Chapman and Hall, p. 128-152, 1988.

NOVASKI, Olívio. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, p. 60-61, 1994.

PUERTAS, I; LUIS C. J. A study on the machining parameters optimisation of electrical discharge machining. **Journal Materials Processing Technology**, Nivarra, n.143-144, p. 521-526, dec. 2003.

REHBEIN, W.; SCHULZE, Hans-Peter; MECKE, K.; WOLLENBERG, G.; STORR, M. Influence of selected groups of additives on breakdown in EDM sinking. **Journal of Materials Processing Technology**, Stuttgart, n. 149, p. 58-64, fev. 2004.

SALES, Wisley Falco; SANTOS, Sandro Cardoso. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber editora, 2007.

SALOMÃO, Rogério de Paulo; ROSA, Silvia N.; MORGADO, Antônio J. F.; ARANTES, Luciano A.; SILVA, Evaldo M.; RASLAN, Alberto Arnaldo. **Influência do fluido dielétrico nas modificações superficiais do Aço M2**. Uberlândia. Disponível em: <<http://www.google.com.br>>. Acesso em: 28 fev. 2007.

SCHULZE, Hans-Peter; LÄUTER, Markus; WOLLENBERG, Günter; STORR, Manfred; REHBEIN, Wilhelm. **Investigation of the pre-ignition stage in EDM**. Magdeburg, 2001.

SCHULZE, Hans-Peter; WOLLENBERG, Gunter; LAUTER, Markus; STORR, Manfred; REHBEIN, Wilhelm. **Measurement equipment for investigation of the influence of viscosity of dielectric working fluids on spark erosion.** Magdeburg, dec. 2003.

SCHUMACHER, Bernd M. After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed. **Journal of Materials Processing Technology**, Switzerland, n. 149, p. 376-381, nov. 2003.

SILVA, Nelson Henrique da. **Usinagem de furos de pequenos diâmetros na liga de titânio Ti6Al4V em máquina de eletroerosão por penetração.** Dissertação (Mestrado). 2006. 109f. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

SIMAO, J.; LEE, H. G.; ASPINWALL, D. K.; DEWES, R. C.; ASPINWALL, E. M. Workpiece surface modification using electrical discharge machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Birmingham, n. 43, p. 121-128, aug. 2002.

SOMMER, Carl; SOMMER, Steve; SOMMER Phil. **Complete EDM Handbook.** Disponível em: <<http://www.ReliableEDM.com>>. Acesso em: 01 maio. 2007.

YOSHIDA, Shun. **A influência dos processos de eletroerosão no rendimento de ferramentas – problemas e soluções.** São Paulo. Disponível em: <<http://www.google.com.br>>. Acesso em: 20 jan. 2007.

YIH-FONG, Tzeng; FU-CHEN, CHEN. Investigation into some surface characteristics of electrical discharge machined SKD-11 using powder-suspension dielectric oil. **Journal of Materials Processing Technology**, Taiwan, n.170, p. 385-391, jun. 2005.

ANEXO A – Propriedades químicas e físicas do querosene.

SHELL BRASIL S.A.

ELABORAÇÃO: 10/03/99

FOLHA DE DADOS DE SEGURANÇA

PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS

Estado físico:	Líquido à temperatura ambiente
Cor:	Límpido transparente
Odor:	Característico
Ponto inicial de ebulição:	Cerca de 150 °C
Ponto final de ebulição:	300 °C (máx)
Pressão de vapor:	Dado não disponível
Densidade:	760-822 kg/m ³ a 20 °C
Viscosidade:	2,7 cSt a 20 °C (máx.)
Densidade do vapor (ar = 1):	Dado não disponível
Ponto de fulgor:	40 °C (mínimo)
Limite superior de inflamabilidade:	Em torno de 6 % (V/V)
Limite inferior de inflamabilidade:	Em torno de 1 % (V/V)
Temperatura de auto-ignição:	Cerca de 220 °C
Teor de enxofre: (máximo)	0,30 % (m/m)
Propriedades explosivas:	Em uso pode formar mistura inflamável (vapor e ar).
Propriedades de oxidação:	Nenhuma
Solubilidade em água:	Dado não disponível
Coefficiente de separação n-octanol/água:	Dado não disponível
Taxa de evaporação:	Dado não disponível

ANEXO B – Boletim técnico do fluido mineral sintético Arclean Eletron.



ARCLEAN ELETRON

- Fluido dielétrico, para processo de eletroerosão por penetração.
- Baixa densidade
- Não provoca dermatite
- Odor leve e suave, atóxico
- Alta produtividade e prolonga a vida útil da ferramenta
- Alto ponto de fulgor
- Aditivado com antioxidantes que aumentam sua durabilidade
- Suporta aquecimento adicional
- Aumenta a precisão de operação
- Ótima velocidade de decantação de partículas
- Boa capacidade de molhagem

USOS

ARCLEAN ELETRON é indicado para os processos de acabamentos e desbastes em eletroerosão por penetração. Sendo atóxico e desodorizado, substitui com vantagem, os derivados de petróleo, tais como óleos leves, querosenes, etc., comumente utilizados.

ARCLEAN ELETRON oferece a seguinte documentação de laudos e referências de empresas onde foram executados testes operacionais atestando a excelente performance do produto:

- Irritabilidade Dérmica (Instituto Adolfo Lutz);
- Toxidez DL 50 (Bioagri);
- Rigidez Dielétrica (IPT);
- AGIE CHARMILLES (Suíça);

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

Aspecto.....	Líquido. incolor
Densidade 20/4 °C (g/mL).....	0,780 - 0,810
Ponto de fulgor (ASTM D-56°C).....	mín.110
Corrosão ao cobre	1a
Viscosidade 40°C (cst).....	2,3 - 2,5



**TRANSFORMAÇÃO
SEM AGRESSÃO**



www.achem.com.br

ANEXO C – Manual de informações do produto ENVIROTEMP FR3.

Propriedades iniciais típicas do fluido.

Propriedade	Valor	Método de Ensaio
Elétrica		
Rigidez Dielétrica	56kV @ 25°C (gap 2.0 mm)	ASTM D1816
Permissividade Relativa [Constante Dielétrica]	3.2 @ 25°C	ASTM D924
Fator de Dissipação [Fator de Potência]	0.08 @ 25°C 3.0 @ 100°C	ASTM D924
Resistividade Volumétrica	20 x 10 ¹² Ω-cm @ 25°C	ASTM D1169
Rigidez de Impulso (Esfera a Esfera)	226 kV @ gap de 0.15"	ASTM D3300
Tendência de Gás	-79 (µL/min)	ASTM D2300
Física e Química		
Densidade Relativa	0.92 @ 25°C	ASTM D129
Tensão Interfacial	24 mN/m @ 25°C	ASTM D971
Índice de Neutralização (Ácida)	0.04 mg KOH/g	ASTM D974
Viscosidade Cinemática	34 cSt @ 40°C 8 cSt @ 100°C	ASTM D445
Conteúdo de Umidade	30 mg/kg	ASTM 1533B
Saturação de Água Relativa	2 – 3%	Método CPS
Solubilidade de Ar	16% @ 25°C @ 1 atm.	ASTM D2779
Aparência	Limpa, Verde Claro	ASTM D1524
Cor	L 0.5	ASTM D1500
Térmica		
Ponto de Fulgor (Vaso Fechado)	316°C	ASTM D93
Ponto de Fulgor (Vaso Aberto)	330°C	ASTM D92
Ponto de Combustão (Vaso Aberto)	360°C	ASTM D92
Ponto de Fluides	-21°C	ASTM D97
Condutividade Térmica	4 x 10 ⁻⁴ cal/(cm • sec • °C) @ 25°C	Método CPS
Coefficiente de Expansão	7.4 x 10 ⁻⁴ cc/cc/°C @ 25°C	Método CPS
Capacidade Calorífica	2.10 J/g°C @ 50°C 2.39 J/g°C @ 100°C	ASTM E1269
Propriedades Ambientais		
Taxa BOD/COD	45%	SM5210B
Biodegradação Aquática	100%	EPA OPPTS 835.3100
Fácil Biodegradação	100%	EPA OPPTS 835.3100
Toxicidade Aguda a Alevinos de Trutas	Mortalidade Zero para Ciclo de Teste Completo	OECD 203